

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Manual d'usuari per un programari informàtic de
disseny de sistemes autònoms d'electrificació
rural per països en desenvolupament**

MEMÒRIA

Autor: Pere Graugés Graell
Director: Bruno Domenech Lega
Convocatòria: Gener 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Actualment hi ha més de 1000 milions de persones al món que no disposen d'accés a l'energia elèctrica. La majoria d'aquestes es troben en els països en vies de desenvolupament, i especialment en comunitats en les zones rurals. Prosperar sense electricitat és impossible, així que cal treballar per revertir aquesta dada.

Un grup de recerca de la UPC està realitzant un projecte per l'electrificació de zones aïllades a l'Amèrica Llatina. Han dut a terme una metodologia per a electrificar poblacions on no arriba la xarxa tradicional, combinant el subministrament elèctric individual amb les microxarxes, utilitzant energia eòlica i solar i tenint en compte les preferències de l'usuari.

La metodologia es pot dividir en 2 etapes. La primera consisteix en fer unes avaluacions prèvies de la zona des dels punts de vista socioeconòmic, energètic i tècnic. La segona representa el propi disseny, i es divideix en 3 nivells, en cadascun dels quals s'estudia la influència d'algun factor sobre el cost, i en els que l'usuari pot intervenir en funció de les seves preferències.

Posteriorment, s'ha realitzat un programari informàtic per realitzar aquesta metodologia. L'objectiu principal del TFG és el de validar aquest programa informàtic, comprovar que el procediment que aquest realitza és el que hauria de ser i que la seva interfície funciona correctament.

Per assolir aquest objectiu, primer s'haurà de dur a terme un procés de familiarització amb el programa, a base d'interactuar-hi i anar fent proves. Posteriorment, es realitzarà una experimentació d'un cas d'una població que serveixi com a exemple il·lustratiu i com a validació del correcte funcionament del programa. Finalment, es realitzarà un manual d'usuari per tal que qualsevol persona que hi estigui interessada pugui ser capaç d'utilitzar el programa.

Sumari

SUMARI	5
1. PREFACI	7
1.1. Origen del projecte.....	7
1.2. Motivació.....	7
1.3. Requeriments previs.....	8
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Objectius del projecte	9
2.2. Abast del projecte	10
3. PROBLEMÀTICA DE L'ELECTRIFICACIÓ DE ZONES RURALS AÏLLADES	11
3.1. Descripció de les zones rurals aïllades.....	11
3.2. Desenvolupament i accés a l'energia elèctrica	11
3.3. Finançament	13
3.4. Models per l'electrificació de les zones rurals aïllades.....	14
3.5. Sistemes híbrids eòlic-solars	15
4. METODOLOGIA PEL DISSENY DE SISTEMES D'ELECTRIFICACIÓ AUTÒNOMS	18
4.1. Primera etapa	19
4.2. Segona etapa.....	20
4.2.1. Nivell 1.....	21
4.2.2. Nivell 2.....	22
4.2.3. Nivell 3.....	22
4.3. Processos iteratius en la presa de decisions.....	23
5. GENERACIÓ I SELECCIÓ D'ALTERNATIVES D'ELECTRIFICACIÓ	24
5.1. Generació d'alternatives d'electrificació.....	24
5.1.1. Consideracions tècniques i socials	24
5.1.2. Modelització matemàtica	26
5.2. Selecció d'alternatives d'electrificació	27
5.2.1. Selecció de criteris	27
5.2.2. Ponderació de criteris	28
5.2.3. Avaluació d'alternatives	29

6. APLICACIÓ DEL SOFTWARE	32
6.1. Introducció de dades	32
6.2. Nivell 1	39
6.2.1. Pantalla de resultats	39
6.2.2. Creació d'un nou nivell 1	42
6.2.3. Execució del nivell 2	42
6.3. Nivell 2	43
6.3.1. Pantalla de resultats	43
6.3.2. Creació d'un nou nivell 2	46
6.3.3. Execució del nivell 3	46
6.4. Nivell 3	47
6.4.1. Pantalla de resultats	47
6.4.2. Creació d'un nou nivell 3	49
6.5. Arxius	49
6.5.1. Carpetes de les solucions	49
6.5.2. Documents Excel	51
7. CAS D'ESTUDI EXEMPLIFICAT	53
7.1. Entrada de dades	53
7.2. Nivell 1	55
7.3. Nivell 2	58
7.4. Nivell 3	62
8. PRESSUPOST	65
9. IMPACTE SOCIAL I AMBIENTAL	66
CONCLUSIONS	67
AGRAÏMENTS	69
BIBLIOGRAFIA	70
Referències bibliogràfiques	70

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

Una part important de la població mundial, més de 1000 milions de persones, no té accés a l'energia de forma regular. La major part d'aquestes es troben en països en vies de desenvolupament. En aquest context, i entenent que l'electricitat és necessària per tenir una vida digna, s'estan dedicant molts esforços en intentar revertir aquesta situació.

La UPC porta anys realitzant un projecte que té com a objectiu el disseny de l'electrificació per poblacions rurals en l'Amèrica Llatina utilitzant sistemes basats en l'energia solar i eòlica. Aquests sistemes són autònoms per tal de poder donar abast energètic a poblacions on no arriba la xarxa tradicional, i subministren energia als diferents punts de la comunitat mitjançant cablejat formant microxarxes.

Aquest procés consta de dues etapes: una primera on es fan unes avaluacions socioeconòmiques, energètiques i tècniques de la població i una segona on es realitza el propi disseny del sistema. A més, la segona etapa es divideix en 3 nivells, on es va evolucionant progressivament en el disseny intentant minimitzar el cost i tenint en compte les preferències de l'usuari.

Per realitzar aquesta segona etapa es va dissenyar un programa informàtic per tal que els usuaris poguessin treballar amb la metodologia de forma més senzilla. És en aquest punt del projecte on s'emmarca aquest TFG, que es basa en validar el correcte funcionament d'aquest programa.

1.2. Motivació

Com a futur enginyer, el món de l'energia en general em resulta molt proper, i el de les energies renovables en particular, em sembla molt interessant, i encara més emmarcat en un context on s'utilitzen per afavorir el desenvolupament. A més, em sembla un fet inevitable que les energies renovables tindran cada cop un paper més important respecte les tradicionals.

Al conèixer aquest projecte de la UPC, em va atreure el fet de comprovar com, a través de models matemàtics, es pot arribar a dissenyar una cosa tan complexa com l'electrificació d'una població a partir d'unes dades inicials i uns criteris de l'usuari.

1.3. Requeriments previs

Abans de realitzar el manual d'usuari, s'ha hagut de dedicar una sèrie de temps a ajudar a acabar el propi programa i, un cop ja ha estat finalitzat, a realitzar moltes proves de diferent tipus per detectar i posteriorment poder corregir errors. Val a dir que tot aquest procés ha estat útil a l'hora de realitzar el manual d'usuari, ja que durant el procés s'ha anat assolint un alt grau de coneixença del programa.

Per aquesta part va ser necessària un cert coneixement en informàtica, sobretot amb el programa *Excel*, que és on es van haver de realitzar més modificacions.

Quant al projecte en què s'engloba aquest TFG, per tal de comprendre els diferents models presentats s'han requerit uns certs coneixements de modelització, assolits en l'assignatura d'Optimització i Simulació, i algunes nocions bàsiques en electricitat, aconseguides en l'assignatura d'Electrotècnica.

2. Introducció

En zones rurals de l'Amèrica Llatina hi ha percentatges considerables de gent que no té accés a la xarxa elèctrica. Aquest fet va moure a un grup d'investigadors de la UPC a realitzar un projecte per l'electrificació d'aquestes zones.

La metodologia en què es basa aquest projecte es pot dividir en dues etapes: una primera en què es realitzen una sèrie d'avaluacions sobre la població que es vol electrificar, i una segona en què pròpiament es realitza el disseny de l'electrificació de la zona.

A més, aquesta segona etapa està dividida en 3 nivells, cadascun dels quals té un procés de generació d'alternatives i de selecció d'alternatives en què ha d'intervenir l'usuari segons les seves preferències. Dins d'aquest procés, si l'usuari pren una sèrie de decisions que veu que l'estan portant a dissenys que no li interessin, pot tirar enrere i dissenyar noves alternatives.

S'ha creat un programa informàtic que realitza aquesta metodologia.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu general del TFG és validar el programa informàtic, tant el procediment que realitza com el correcte funcionament de la seva interfície.

Com a objectius específics, es planteja:

- Interactuar i familiaritzar-se amb el programari informàtic.
- Fer un cas pràctic, utilitzar el programa per realitzar l'electrificació d'una població que signifiqui un cas il·lustratiu.
- Realitzar un manual d'usuari del programari amb què qualsevol persona interessada sigui capaç d'utilitzar-lo, identificar els resultats i resoldre possibles dubtes que li sorgeixin.

Tot i que a l'hora de treballar s'ha seguit cronològicament l'ordre en què s'han exposat els objectius específics, en aquesta memòria apareix primer l'explicació del manual d'usuari i

després el cas pràctic d'aplicació del programa perquè d'aquesta forma l'exemple s'entengui millor.

Per realitzar el primer objectiu específic, la familiarització amb el programa, s'ha estat durant un temps treballant amb programadors per tal d'analitzar el programa des de diferents punts de vista i detectar-hi errades i poder proposar millores.

El segon objectiu específic, la realització del cas pràctic, s'ha dut a terme un cop ja s'havia finalitzat el programa i s'havia confirmat el correcte funcionament d'aquest. La utilitat d'aquest punt és, precisament, la de demostrar que el programa funciona correctament i il·lustrar què fa i com ho fa.

Finalment, el tercer objectiu específic, la realització del manual d'usuari, s'ha dut a terme per tal d'intentar aconseguir que el programa arribi a més gent.

2.2. Abast del projecte

Com ja s'ha comentat, aquest TFG s'engloba dins d'un projecte més gran que planteja una metodologia per l'electrificació de zones rurals. Més concretament, aquest TFG està relacionat amb el programa que realitza aquesta metodologia.

L'autor d'aquest TFG ha col·laborat en la creació d'aquest programa des del punt de vista de la validació. S'ha treballat juntament amb programadors i la tasca que s'ha realitzat ha estat la de verificar el correcte funcionament del programa. D'una banda, s'ha comprovat que el programa sigui realment un reflex de la metodologia en què es basa i s'arribin a les mateixes solucions. De l'altra, s'ha col·laborat en el disseny de la interfície del programa informàtic, comprovant com es relacionava amb l'usuari quan aquest l'utilitzava.

Cal afegir, però, que l'autor d'aquest TFG no ha entrat mai en el terreny de la programació, és a dir, no ha treballat sobre el codi que realitzava aquest programa, quan detectava un error que hi tenia relació ho tractava amb els programadors.

3. Problemàtica de l'electrificació de zones rurals aïllades

En aquest capítol s'explicarà el concepte de zona rural aïllada, s'exposarà quina és el nivell d'electrificació que tenen aquestes actualment, els possibles mètodes de finançament per fer aquestes operacions i els models d'electrificació que es poden emprar. Finalment, s'analitzarà amb una mica més de detall el sistema híbrid eòlic-solar.

3.1. Descripció de les zones rurals aïllades

El terme zona rural aïllada es refereix a aquelles localitzacions on, bé sigui per la seva dificultat d'accés o bé per raons econòmiques, la connexió a les xarxes de distribució és difícil. Les zones rurals aïllades es caracteritzen per tenir una alta dispersió geogràfica, comptar amb infraestructures poc desenvolupades i, en molts casos, amb orografies complicades. A més, tenen una densitat de consum d'energia baixa i baix nivell d'ingressos.

3.2. Desenvolupament i accés a l'energia elèctrica

Pot definir-se l'accés a l'energia com l'accés a serveis d'energia nets, fiables i assequibles per cuinat, escalfament, il·luminació, salut, comunicacions i ús productiu.

Tot i que actualment no hi ha tractats internacionals que reconeguin el dret a l'accés a l'energia, la Declaració Universal dels Drets Humans del 1948 sí que reconeix una sèrie de drets que no es poden aconseguir sense l'accés als serveis energètics; per exemple el de tenir un nivell de vida adequat, el dret a una feina en condicions equitatives o el dret a l'educació. Així doncs, existeix una relació clara entre l'accés a l'energia i el desenvolupament dels pobles.

Actualment una part considerable de la població no té accés a energies modernes i netes. La major part d'aquesta està concentrada en les zones d'Àsia i Àfrica sub-sahariana. En altres regions amb unes més elevades taxes d'urbanització, com Amèrica Llatina, es troba una carència d'accés a l'energia en les zones rurals.

A la Taula 1 s'hi indiquen els ratis d'electrificació total, urbà i rural en diferents zones. Es pot observar que, malgrat que els ratis d'electrificació en zones urbanes són relativament alts en la majoria de casos, aquests són considerablement més baixos en les zones rurals, i és que el rati d'electrificació rural en països en vies de desenvolupament és del 68%. Destaca també la gran quantitat de gent a l'Àfrica i a l'Àsia que no té accés a l'electricitat, 587 i 675 milions respectivament.

	Població sense electricitat [milions]	Rati d'electrificació [%]	Rati d'electrificació urbana [%]	Rati d'electrificació rural [%]
Àfrica	587	41,8	68,8	25,0
Àsia	675	81,0	84,0	73,2
Amèrica Llatina	32	93,2	98,8	73,6
Orient Mitjà	21	89,0	98,5	71,8
Països en vies de desenvolupament	1314	74,7	90,6	63,2
Món	1317	80,5	93,7	68,0

Taula 1. Accés a l'electricitat. Dades extretes de “Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales”, de Bruno Domenech Lega.

L'avantatge principal que representa l'electrificació a les zones rurals és la il·luminació. La il·luminació mitjançant electricitat és molt més econòmica que mitjançant qualsevol mètode alternatiu. Un altre avantatge és la possibilitat d'ús de la televisió, ja que això permet la comunicació amb zones no aïllades i a més pot desenvolupar una certa funció educativa. A part de particulars, també s'obtenen beneficis en llocs públics, com per exemple en hospitals. Amb l'ús d'electricitat, aquests poden utilitzar equips que requereixin alimentació elèctrica pel seu funcionament, així com obrir més hores al dia (quan no hi hagi llum natural). Finalment, també pot utilitzar-se l'electricitat amb fins productius, ja que pot ajudar a petites empreses o negocis familiars.

3.3. Finançament

Hi ha diferents possibilitats pel que fa al finançament de l'electrificació de les zones rurals aïllades. Algunes d'aquestes es mostren a la Taula 2, juntament amb una breu descripció. Cal destacar que molts cops són ONGs les que acaben duent a terme el finançament d'aquestes operacions.

Sistema de Finançament	Descripció
Públic	Sistemes promoguts pel govern mitjançant una licitació. El licitant té compromès l'obra i el manteniment.
Sistema comunitari	La pròpia comunitat finança la seva xarxa elèctrica (pot fer-ho mitjançant microcrèdits).
Privat	Venda o lloguer dels sistemes per part de companyies privades.
ONGs	ONGs donen sistemes d'energies renovables a comunitats amb pocs recursos.

Taula 2. Tipus de finançament per l'electrificació de les zones rurals aïllades

Com que l'electrificació d'aquestes zones no sol sortir rentable per les empreses de distribució, molts cops els promotors d'aquest tipus de projectes són ONGs, empreses o governs que sovint no tenen els coneixements adequats per dur-los a terme. Això causa que el resultat final no sigui sempre l'idoni, i que com a conseqüència l'usuari no quedi satisfet per diferents possibles motius:

- L'energia subministrada no es correspon amb la que necessita l'usuari. Bé pot ser menor, cas en què no es poden cobrir les necessitats; o desproporcionadament gran.
- Considerables diferències entre el subministrament energètic per diferents usuaris.
- El nivell econòmic de l'usuari no és suficient pels costos de manteniment de la instal·lació: substitució de bateries, averies dels aerogeneradors...

Per evitar aquesta situació, algunes de les entitats que promouen l'electrificació de les zones rurals aïllades estan començant a realitzar projectes que tinguin més contacte amb la població i tinguin en compte el seu entorn socioeconòmic. Així, el disseny tècnic queda condicionat pels requeriments socials.

3.4. Models per l'electrificació de les zones rurals aïllades

Podem diferenciar dos models possibles per l'electrificació d'aquestes zones:

- Extensió de xarxes. Aquesta estratègia, tot i ser la més utilitzada, pot ser també la que presenti majors dificultats si l'orografia del terreny és complicada i la zona a electrificar es troba lluny d'un centre urbà. El cost acostuma a ser elevat i amb el temps presenta greus efectes en el detriment de la qualitat del servei.
- Sistemes aïllats. Aquesta alternativa és cada cop més utilitzada en aquelles zones on l'extensió de xarxes es fa inviable a causa del seu cost. Es tracta de petits sistemes descentralitzats, com microcentrals hidroelèctriques, generadors eòlics, l'energia solar o motors de combustió dièsel. Aquests sistemes poden ser individuals o poden estar units mitjançant cablejat i formant microxarxes.

A continuació s'expliquen de forma més detallada alguns dels sistemes aïllats.

- Microcentrals hidroelèctriques: es basen en l'aprofitament de l'energia de l'aigua dels rius per convertir-la en energia elèctrica, mitjançant turbines. Aquestes petites centrals són compreses entre 250 i 5000 kW i habitualment s'utilitzen no tant per cases aïllades sinó per a petits nuclis rurals. Normalment no són necessaris sistemes d'acumulació. El problema d'aquest tipus d'instal·lacions, que tenen bona relació entre kW instal·lat i cost de la instal·lació, rau en què la inversió inicial requerida és elevat, a causa que es requereix d'una certa obra civil.
- Generadors eòlics: consisteix en l'ús aerogeneradors per aprofitar l'energia eòlica. El funcionament consisteix en extreure part de l'energia cinètica del vent mitjançant unes pales que giren al voltant d'un eix. Té l'inconvenient de no ser constant ni en el lloc ni en el temps. Així doncs, són necessaris sistemes d'acumulació. La relació entre kW produït i cost de la instal·lació és bo.

- Energia solar: consisteix a transformar la radiació solar en energia elèctrica, mitjançant uns captadors formats per cèl·lules fotovoltaïques. Resulta una opció adequada en el cas de cases aïllades ja que la inversió inicial és prou econòmica. Són necessaris sistemes d'acumulació ja que l'energia del sol és variable durant el dia i la relació entre kW instal·lat i cost de la instal·lació és baixa.
- Motors de combustió dièsel: motors que generen electricitat mitjançant la combustió. A diferència de les anteriors, es tracta d'un tipus d'instal·lació d'energies no renovables. Té l'inconvenient d'haver d'adquirir el dièsel, ja que es poden donar fluctuacions en el preu d'aquest o pot haver-hi problemes en el transport si es tracta de comunitats molt aïllades. La instal·lació inicial no és cara però el cost durant la vida útil de la instal·lació és elevat.

A part d'aquests sistemes, que són els convencionals, n'existeixen d'altres de menys utilitzats:

- Turbulent Hydro: Una petita turbina instal·lada en un canal paral·lel al riu. És suficient amb un salt d'aigua d'1,5 metres per fer-la funcionar. S'instal·la en horitzontal dins d'uns canals prefabricats, cosa que fa que l'obra civil sigui mínima.
- Vortex: Es tracta d'un aerogenerador sense pales. Un cilindre vertical que, en entrar en contacte amb el vent, oscil·la d'un costat a l'altre. Suposa un avanç respecte un aerogenerador típic des del punt de vista del seu baix cost de manteniment.
- Tubs d'aigua a alta velocitat: Es fa passar un cert cabal d'aigua per dins d'un tub estret situat al costat d'un riu. Aquesta agafa una gran velocitat i, al final del tub, surt per fer girar una sínia d'aigua.

3.5. Sistemes híbrids eòlic-solars

Més enllà de la possibilitat d'utilitzar un d'aquests sistemes, existeix també l'opció de combinar-ne dos, fent així un sistema híbrid. Aquesta opció resulta força interessant ja que permet aprofitar els avantatges de cadascuna de les opcions, perdent així variabilitat i sent menys dependents dels sistemes d'acumulació.

En el projecte en què s'inclou aquest treball s'ha decidit utilitzar sistemes híbrids eòlic-solars., com el que mostra la Figura 1. Es decideix no utilitzar sistemes hidràulics ja que aquests depenen necessàriament de l'existència d'un riu, que no sempre es pot garantir; i de la tecnologia dièsel perquè es tracta d'una energia poc sostenible davant les altres opcions.

En els sistemes eòlic-solars (Figura 1), l'energia es produeix als aerogeneradors i als panells fotovoltaics. Aquests consten d'uns reguladors per tal de protegir les bateries en cas de descàrregues i sobrecàrregues, que en el cas dels aerogeneradors són interns. Les bateries s'ocupen d'emmagatzemar l'energia per distribuir-la en hores en què la generació sigui menor al consum. Els inversors transformen l'energia contínua, que és com esta emmagatzemada a les bateries, en alterna, que és la que utilitzada pels aparells de consum. Finalment, aquesta energia es distribueix als diferents punts de consum. Es pot fer de forma individual o creant microxarxes si hi ha més d'un punt connectat.

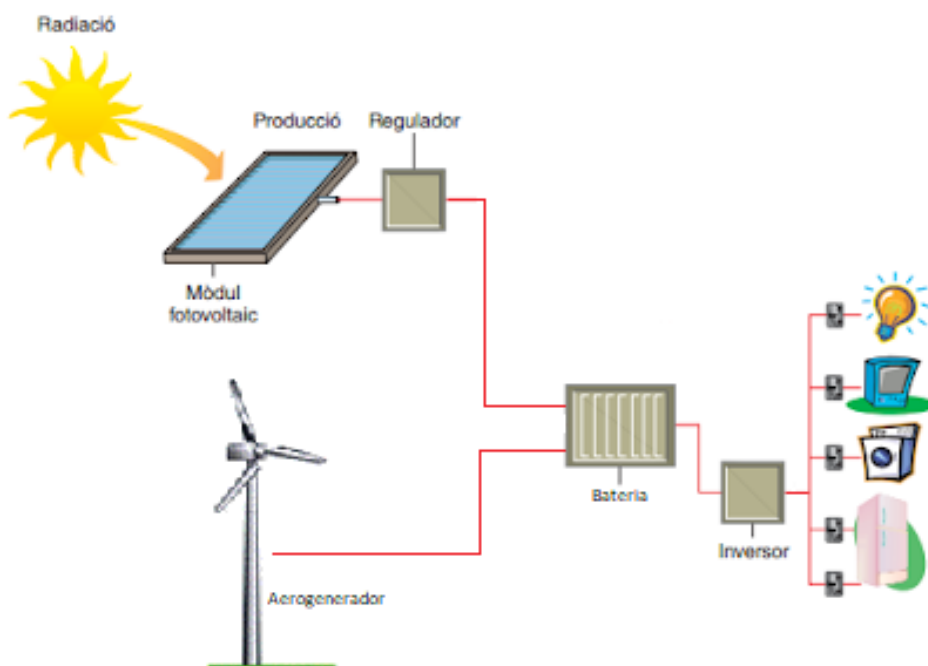


Figura 1. Producció, emmagatzematge i distribució de l'energia en un sistema eòlic-solar

Dins del sistema de les microxarxes, podem diferenciar-ne dos tipus:

- En anell o bucle tancat. Consta de diversos punts de generació connectats entre si. Té l'avantatge que, en el cas que un punt de generació falli, es pot seguir generant

energia amb l'anterior.

- En antena o radial. Consta d'un únic punt de generació connectat amb els diferents punts de consum. En un punt de consum hi pot haver únicament una entrada (de generació) però més d'una sortida (a altres punts de consum). És menys segura però més econòmica que l'opció en anell i és la més adequada per zones rurals aïllades. És l'opció escollida pel projecte.

4. Metodologia pel disseny de sistemes d'electrificació autònoms

Partint de la base que es disposa d'una població a electrificar, un grup de recerca de la UPC ha dissenyat una metodologia (Figura 2) que guia a l'usuari en el procés de disseny del sistema d'electrificació fins a obtenir quins equips s'ha d'instal·lar i on, així com la configuració de distribució a implementar. Com ja s'ha comentat, es treballarà amb sistemes del tipus eòlic-solar i es combinaran els sistemes individuals amb les microxarxes.

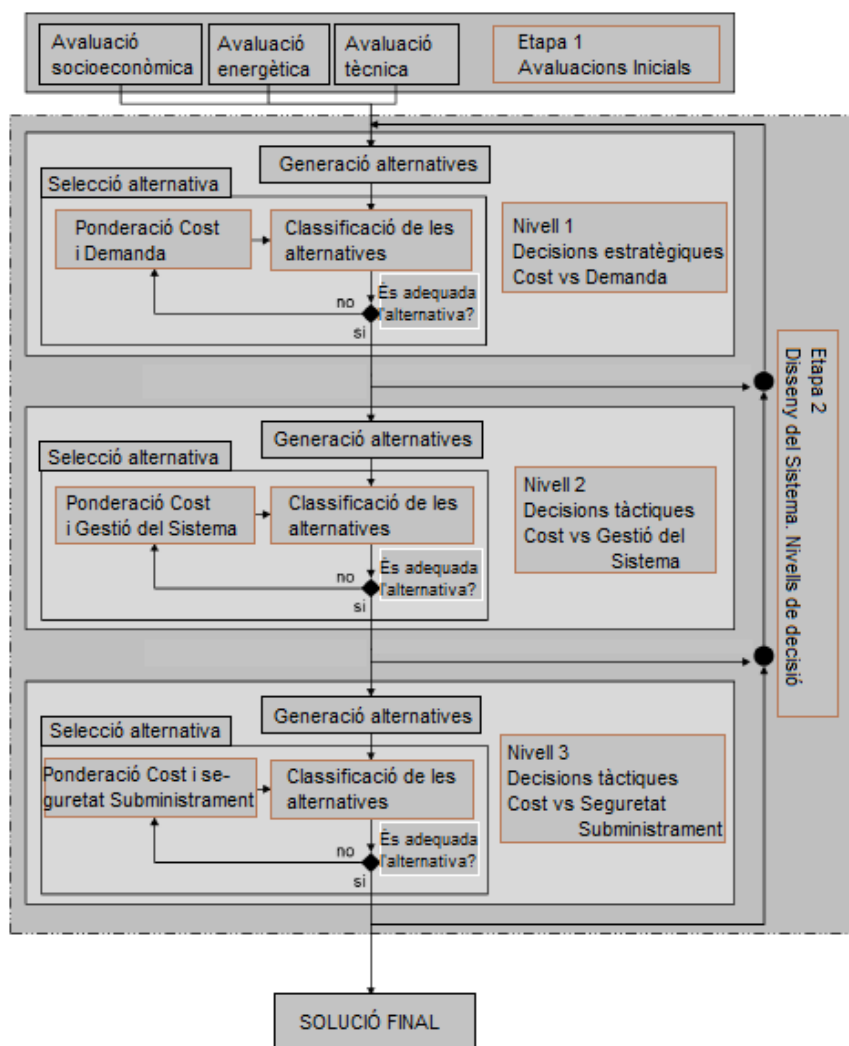


Figura 2. Estructura de la metodologia pel disseny de sistemes d'electrificació autònoms. Adaptat de Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales”, de Bruno Domenech Lega.

La metodologia proposada consta de dues etapes, tal i com es pot veure a la Figura 2: avaluacions inicials i disseny del sistema. En la primera etapa, es realitzen 3 avaluacions sobre la zona: socioeconòmica, energètica i tècnica. La segona etapa es divideix en 3 nivells de decisió, i cadascun d'aquests té dues fases: una de generació d'alternatives, i una de selecció d'alternatives. En aquest capítol s'explicaran en profunditat aquestes dues etapes.

4.1. Primera etapa

La primera etapa, avaluacions inicials, consisteix en 3 avaluacions de la comunitat que es vol electrificar. Primer es realitza una avaluació socioeconòmica, en què es determinen els punts de consum, la seva demanda i aspectes socials propis de la comunitat. També es realitza una avaluació energètica, on s'estudien els recursos energètics disponibles en els diferents punts de la població. Finalment, l'avaluació tècnica estudia el cost i les característiques tècniques dels equips que es poden utilitzar. A continuació s'expliquen de forma més detallada aquestes tres avaluacions.

En primer lloc, en l'avaluació socioeconòmica es fa un estudi social i econòmic de la comunitat a electrificar. Primer s'estudien les característiques de la comunitat: l'emplaçament d'aquesta, altres projectes d'electrificació similars en poblacions properes, el clima de la zona i finalment la ubicació i característiques dels diferents punts a electrificar. També s'estudien les característiques de la població: la quantitat d'habitants, el grau de riquesa d'aquests, possibles conflictes locals, les organitzacions socials i les persones més importants de la població. Finalment, s'estudien les fonts d'energia prèvies a l'electrificació i els possibles futurs usos que se li pot donar a aquesta. Serà aquest últim estudi el que permeti determinar la demanda d'energia i de potència dels diferents punts.

En l'avaluació energètica es determina l'energia que es pot produir en els diferents punts mitjançant els recursos eòlics i solars disponibles. Determinar la quantitat d'energia que es pot generar a través del recurs eòlic no és senzill, ja que es tracta d'una font molt variable. S'ha de mesurar el vent en un punt de la població, situat a una altura similar d'on es volen instal·lar els aerogeneradors, i extrapolar aquesta dada a la resta de punts de la comunitat mitjançant un programa informàtic. Finalment, s'ha de calcular la potència que es pot generar amb aquest recurs. Quant al recurs solar, la seva variació està força estudiada i es pot determinar de força bastant precisa la seva variació. Es pot conèixer fàcilment ja que hi ha

bases de dades obtingudes mitjançant informació de diferents estacions meteorològiques.

Finalment, en l'avaluació tècnica es fa un estudi dels diferents equips i components disponibles en el mercat. Per obtenir el millor disseny possible s'ha de ser coherent amb els diferents equips escollits. Per exemple, s'ha de seleccionar reguladors solars amb una potència màxima similar a la que poden generar els panells fotovoltaics escollits. No s'ha de descartar contractar un tècnic especialista per decidir segons quins equips en funció de les característiques del projecte.

4.2. Segona etapa

La segona etapa, disseny del sistema, inclou les fases de generació i selecció d'alternatives d'electrificació, i es divideix en 3 nivells de decisió, ordenats segons la importància de les decisions a prendre.

El fet de dividir l'etapa en 3 nivells, i que dins de cadascun d'aquests hi hagi primer un procés de generació d'alternatives i després un de selecció d'aquestes alternatives, provoca que a cada nivell de decisió es generi un número raonable d'alternatives i que es puguin analitzar correctament, i a cada nivell es comparin possibles solucions amb diferents valors d'estudi però similar importància.

Es proposen 4 criteris per la fase de selecció d'alternatives, amb diferents subcriteris dins de cadascun d'ells:

- Cost: indica el cost de cada alternativa generada.
- Demanda: té com a subcriteris: energia, potència i autonomia. Indiquen la quantitat d'energia, de potència i d'autonomia amb què es subministra electricitat als usuaris.
- Gestió del sistema: té com a subcriteris la quantitat, la mida i l'abast de les microxarxes, i també la instal·lació dels mesuradors. Indica la forma en què s'organitza la comunitat en relació a l'electrificació.
- Seguretat del subministrament: té com a subcriteris el percentatge d'energia solar, la quantitat d'equips de generació i l'energia subministrada a usuaris individuals. Indica la regularitat del subministrament elèctric davant de possibles mancances de

recursos o averies als equips.

Aquests 4 criteris no es consideren de forma simultània, sinó en els 3 nivells de decisió de què consta aquesta segona etapa. Per fer la divisió en els 3 nivells, s'ha tingut en compte la importància de cada criteri.

- El cost és un criteri especialment limitant en les zones on s'enfoca aquest treball, per tant es té en compte en tots 3 criteris de decisió.
- La demanda és un aspecte molt important a l'hora de dissenyar un sistema, ja que dues demandes diferents poden donar lloc a dues solucions d'electrificació completament diferents, i si es volgués modificar la demanda s'hauria de fer un replantejament total del disseny. Tant la mida de les microxarxes com les necessitats dels equips de generació poden variar molt en funció de la demanda. Així doncs, es decideix estudiar la demanda en el primer nivell de decisió.
- La gestió del sistema d'electrificació té una importància mitjana sobre el disseny de les solucions. Sense una mínima idea d'una possible solució, és difícil preveure la quantitat, mida i abast de les microxarxes; és per això que no tindria gaire sentit estudiar-les al primer nivell. Un cop determinada la demanda, però, el seu estudi ja pren major sentit. La gestió del sistema s'estudia al segon nivell.
- La seguretat del subministrament es relaciona amb els equips de generació, i planteja modificacions sobre els equips d'instal·lació amb petites inversions addicionals. Això no tindria sentit si no s'hagués dissenyat ja prèviament la configuració del sistema. S'estudia la seguretat del subministrament al tercer nivell.

A continuació s'analitzen amb una mica més de detall els tres nivells en què se separa aquesta segona etapa.

4.2.1. Nivell 1

Com ja s'ha comentat, al primer nivell s'enfronten els criteris cost i demanda. S'estudia la influència sobre el cost dels diferents valors pel consum d'energia i de potència en cada punt i l'autonomia requerida.

El decisor proposa una quantitat bàsica i uns increments percentuals d'energia, potència i

d'autonomia. Combinant tots els valors es generen les diferents alternatives. Dos valors diferents de demanda solen donar lloc a dues solucions totalment diferents. Es defineixen les agrupacions d'usuaris que es poden unir formant una microxarxa.

4.2.2. Nivell 2

En el segon nivell s'enfronten els criteris cost i gestió del sistema. S'estudia la influència sobre el cost en funció del número màxim de microxarxes, el número mínim d'usuaris per microxarxa, el número màxim d'usuaris individuals i si s'instal·len mesuradors en tots els punts o només en usuaris en microxarxa.

Com que les microxarxes requereixen d'esforços de coordinació, s'intenta limitar el nombre màxim de microxarxes. Pel mateix motiu, es planteja acotar el nombre mínim d'usuaris per microxarxa, per no tenir una microxarxa que no surti rentable de mantenir. Per estendre al màxim l'electrificació mitjançant microxarxes, també s'estudia establir un número màxim d'usuaris amb electrificació individual. Finalment, es planteja si instal·lar mesuradors en tots els usuaris o només en aquells que formen part d'una microxarxa per estalviar costos. En el segon cas, la tarifa de pagament pels usuaris sense mesurador és fixa.

4.2.3. Nivell 3

En el tercer nivell s'enfronten els criteris cost i seguretat del subministrament. S'estudia la influència sobre el cost de modificar el mínim percentatge de l'energia generada amb panells en cada punt de generació, el número mínim d'equips de generació en cada punt de generació i el major percentatge d'energia en usuaris individuals enfront a usuaris en microxarxa.

Per tal de millorar la seguretat del subministrament, en primer lloc es desitja maximitzar el percentatge de generació solar, ja que el recurs solar és més regular que l'eòlic. Per tal de millorar la seguretat enfront a averies, es desitja maximitzar la quantitat d'equips de generació, i es proposa un percentatge d'energia addicional en usuaris individuals. Finalment, es planteja imposar un percentatge d'energia addicional en usuaris individuals per compensar les avantatges de les microxarxes davant dels usuaris individuals.

4.3. Processos iteratius en la presa de decisions

A vegades no resulten evidents els valors que s'han de prendre com a solucions a estudiar en un cert nivell. Es poden donar casos en què, per exemple, es plantegi un cert nivell de demanda d'energia, i al generar les alternatives, el cost obtingut per aquella demanda sigui exageradament gran pel pressupost de què es disposa. Per aquest motiu, la metodologia consta d'un procés iteratiu per l'estudi del valor objectiu de les solucions, que permet tornar des del final d'un nivell de decisió cap al principi de qualsevol dels anteriors. Així, per exemple, si el decisor s'adonés després d'haver realitzat el nivell 2 que obté que les preferències d'aquest segon nivell no són compatibles amb les solucions obtingudes del primer, el decisor té l'opció de replantejar el nivell 2 amb nous valors objectius per les solucions, o tornar a proposar nous valors objectius pel nivell 1 que s'adaptin més a les seves preferències pel segon.

En segon lloc, per realitzar el procés de selecció de la millor alternativa d'electrificació en cada un dels nivells, cal fer una ponderació dels criteris i subcriteris de cada nivell. Ponderar dos criteris significa assignar un valor a cadascun que representi la importància relativa que té respecte de l'altre. Així doncs, el decisor ha de decidir en cadascun dels nivells quina importància té cada criteri i subcriteri respecte de l'altre. Aquest procés de ponderació es dona quan ja s'han generat les alternatives. Un cop ponderats els criteris, s'obtindrà una classificació de les diferents alternatives. Si el decisor està content amb aquest resultat pot seguir endavant amb el següent nivell, però també pot canviar la ponderació dels criteris i subcriteris per obtenir una nova classificació. Es tracta, per tant, d'un altre procés iteratiu en la ponderació de criteris.

5. Generació i selecció d'alternatives d'electrificació

Com ja s'ha explicat anteriorment, la segona etapa de la metodologia del disseny està dividida en 3 nivells, i dins de cadascun d'aquests 3 nivells hi ha un procés de generació d'alternatives d'electrificació seguit d'un procés de selecció d'alternatives. A continuació s'explicaran amb més detall aquests dos processos.

5.1. Generació d'alternatives d'electrificació

En primer lloc s'exposarà el procés de generació d'alternatives, pel qual s'ha dissenyat un model matemàtic que permet resoldre les opcions d'electrificació dels 3 nivells. S'explicaran les consideracions tècniques i socials que s'han tingut en compte i es presentarà la modelització matemàtica.

5.1.1. Consideracions tècniques i socials

Per realitzar el model s'han tingut en compte diferents consideracions tècniques i socials relacionades amb la generació elèctrica, el sistema d'acumulació i conversió de l'energia i la distribució elèctrica.

Generació elèctrica:

- Com ja s'ha comentat, es considera únicament l'ús de les tecnologies eòlica (mitjançant aerogeneradors) i solar (amb panells fotovoltaics).
- Diferents punts de la població poden tenir potencials eòlics diferents. Com ja s'ha explicat, en el cas eòlic es mesura el vent en un punt i s'extrapola mitjançant programes informàtics. En el cas solar, es pot aproximar constant en tots els punts.
- S'ha d'establir quins seran els punts de generació, on s'instal·laran els equips, que sempre seran punts de consum.
- Els equips de generació han de ser capaços de cobrir la demanda en aquell punt

i, si formen part d'una microxarxa, les de tots els punts que en formen part.

- S'ha de guardar un petit espai en els punts de generació pels panells solars.

Acumulació i conversió de l'energia:

- La demanda d'autonomia es considera igual pels diferents punts de la comunitat. Per garantir-la, s'usen bateries, instal·lades als punts de generació. Han de tenir la capacitat per cobrir la demanda d'autonomia del propi punt i, si formen part d'una microxarxa, de tots els punts que se n'abasteixen.
- Els inversors únicament s'instal·len als punts de generació. La suma de les potències dels inversors en un punt ha de ser major que la demanda de potència d'aquell punt i, en cas que formi part d'una microxarxa, de tots els que se n'abasteixen.
- El factor de simultaneïtat, que fa referència a que no totes les càrregues estan connectades a la vegada. El seu valor s'obté a l'estudi socioeconòmic, i s'obté com la divisió entre la suma de les potències de les càrregues que es poden connectar a la vegada i la suma de totes les potències de les càrregues del punt.
- Es considera un factor de pèrdues d'energia a les bateries i als inversors. Això significa un augment de la demanda d'energia en cada punt.

Distribució elèctrica:

- Mitjançant la diferència de tensió entre dos punts, es determina la secció del conductor. També s'ha de definir la màxima intensitat que pot circular pel cable. Les pèrdues es produeixen únicament als punts de microxarxa.
- La distribució es pot fer mitjançant usuaris individuals o microxarxes. En el segon cas, un punt actua com a generador dels altres i estén el subministrament als altres punts mitjançant conductors.
- Les microxarxes són radials, és a dir, cada punt pot tenir diferents conductors de sortida però només un d'entrada. En cada punt s'instal·la un mesurador que s'encarrega de mesurar el consum.

- Es distribueix a baixa tensió.
- No es considera l'ús d'equipaments que requereixin distribució en trifàsica. Es distribueix en corrent alterna monofàsica.

5.1.2. Modelització matemàtica

El procés de generació de les alternatives es fa mitjançant un model de programació lineal entera i mixta.

Es defineixen diferents paràmetres per la demanda, la generació, els equips d'instal·lació i la definició de la xarxa; i una sèrie de variables per la localització i el tipus d'equips d'instal·lació, els fluxos de tensió i d'energia en cada punt; i per definir els punts de generació, la configuració de les microxarxes i la instal·lació de mesuradors.

Es realitza una funció objectiu que minimitza el cost de la inversió inicial en aerogeneradors, reguladors eòlics, panells fotovoltaics, reguladors solars, bateries, inversors, mesuradors i conductors. Finalment, es plantegen una sèrie de restriccions per la generació i acumulació d'energia, la definició de la xarxa i els equips.

Dins de l'aplicació del model per cada un dels 3 nivells, cal tenir en compte algunes modificacions.

Al nivell 1, es considera l'ús d'un sol regulador diferenciat per cada generador, no es permet, doncs, que un regulador controli dos generadors. S'imposa la instal·lació de mesuradors en tots els punts de consum.

Al nivell 2, es considera el mateix model que a l'1 però afegint-li les restriccions relatives a la gestió del sistema. Només s'incorporen aquestes restriccions al model si s'utilitzen. Si es consideren totes, es té un model amb 16 variants.

D'igual forma, al nivell 3 es treballa amb el mateix model que al 2 però afegint-li les restriccions referents al tercer nivell. També s'incorporen només si s'utilitzen. Si es consideren totes, es té un model amb 8 variants.

A l'hora de resoldre aquest model matemàtic el temps de càlcul pot ser significativament gran, i per això es decideix prendre mesures per adaptar els models sense que el resultat en

surti modificat però guanyant temps de càlcul.

5.2. Selecció d'alternatives d'electrificació

La fase de selecció d'alternatives té lloc dins de cada nivell un cop ja s'han generat les alternatives d'electrificació i consisteix en ordenar aquestes solucions en funció d'uns pesos assignats als diferents criteris i subcriteris de cada nivell. Es realitza un procés de decisió multicriteri que es divideix en 4 punts:

- Selecció de criteris: es determinen els criteris d'avaluació.
- Ponderació de criteris: s'assigna un valor a cada criteri conforme la seva importància respecte els altres.
- Avaluació d'alternatives: s'avalua cada alternativa en funció de cada criteri
- Agregació de resultats: s'eliminen les possibles diferències existents utilitzant diferents mètodes.

5.2.1. Selecció de criteris

Els criteris presos per la fase de selecció d'alternatives han estat exposats al punt 4.2 (Segona etapa), i aquests són: la demanda, la gestió del sistema i la seguretat del subministrament. A més, dins de cada criteri es poden diferenciar subcriteris, també explicats. Així, dins de la demanda trobem l'energia, la potència i l'autonomia. Dins de la gestió del sistema, la quantitat de microxarxes, la mida de les microxarxes, l'abast de les microxarxes, i la instal·lació de mesuradors. Dins de la seguretat del subministrament, el percentatge d'energia solar, la quantitat d'equips de generació i l'energia en usuaris individuals.

Cadascun d'aquests subcriteris té un atribut associat, que defineix concretament de quina forma es valora aquest. A la Taula 3 s'hi detallen, per cadascun dels nivells, els diferents criteris i subcriteris, així com els atributs corresponents.

Criteri	Subcriteri	Atribut
PRIMER NIVELL		
Cost	-	-
Demanda	Energia	Consum d'energia en cada punt de consum
	Potència	Consum de potència en cada punt de consum
	Autonomia	Autonomia requerida
SEGON NIVELL		
Cost	-	-
Gestió del sistema	Quantitat microxarxes	Número màxim de microxarxes
	Mida microxarxes	Número mínim d'usuaris per microxarxa
	Abast microxarxes	Número màxim d'usuaris individuals
	Instal·lació mesuradors	Mesuradors en tots els punts o només en usuaris en microxarxa
TERCER NIVELL		
Cost	-	-
Seguretat del subministrament	Percentatge de generació solar	Mínim percentatge de l'energia generada amb panells en cada punt de generació
	Quantitat d'equips de generació	Número mínim d'equips de generació en cada punt de generació
	Energia en usuaris individuals	Major percentatge d'energia en usuaris individuals enfront a usuaris en microxarxa

Taula 3. Criteris, subcriteris i atributs pels 3 nivells de decisió

5.2.2. Ponderació de criteris

La fase inicial de la ponderació de criteris no és senzilla, ja que escollir uns pesos sense tenir un punt de partida pot portar a resultats confusos. Per aquest motiu, es decideix enquestar a diferents experts en orientació rural per determinar uns pesos inicials. La conclusió que s'extreu de les enquestes es resumeix a la Taula 4, que indica els pesos que s'han decidit prendre per cada subcriteri amb la informació que s'ha recopilat de les entrevistes.

Nivell de decisió	Criteri	Pes	Subcriteri	Pes
Primer	Cost	0,48	-	
	Demanda	0,52	Energia	0,40
			Potència	0,32
			Autonomia	0,28
Segon	Cost	0,48		
	Gestió del sistema	0,52	Quantitat de microxarxes	0,20
			Mida de microxarxes	0,30
			Abast microxarxes	0,32
			Instal·lació mesuradors	0,18
Tercer	Cost	0,47		
	Seguretat del subministrament	0,53	Percentatge generació solar	0,38
			Quantitat equips de generació	0,30
			Energia usuaris individuals	0,32

Taula 4. Estructura de criteris, subcriteris i atributs per cada nivell de decisió. Adaptat de "Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales", de Bruno Domenech Lega.

5.2.3. Avaluació d'alternatives

Pel que fa a l'avaluació de les alternatives, no es tracta d'un procés senzill, ja que es poden barrejar alternatives molt poc semblants o fins i tot criteris qualitius amb de quantitatius. Es vol, a més, que l'eina que realitzi aquest procés sigui senzilla d'utilitzar per facilitar el seu ús a l'usuari. Precisament per aquest darrer motiu, es decideix utilitzar la programació compromís,

que intenta minimitzar la distància respecte una solució utòpica ideal.

Per explicar el seu funcionament, prendrem un exemple del nivell 1, que enfronta el Cost i la Demanda, representat a la Figura 3.

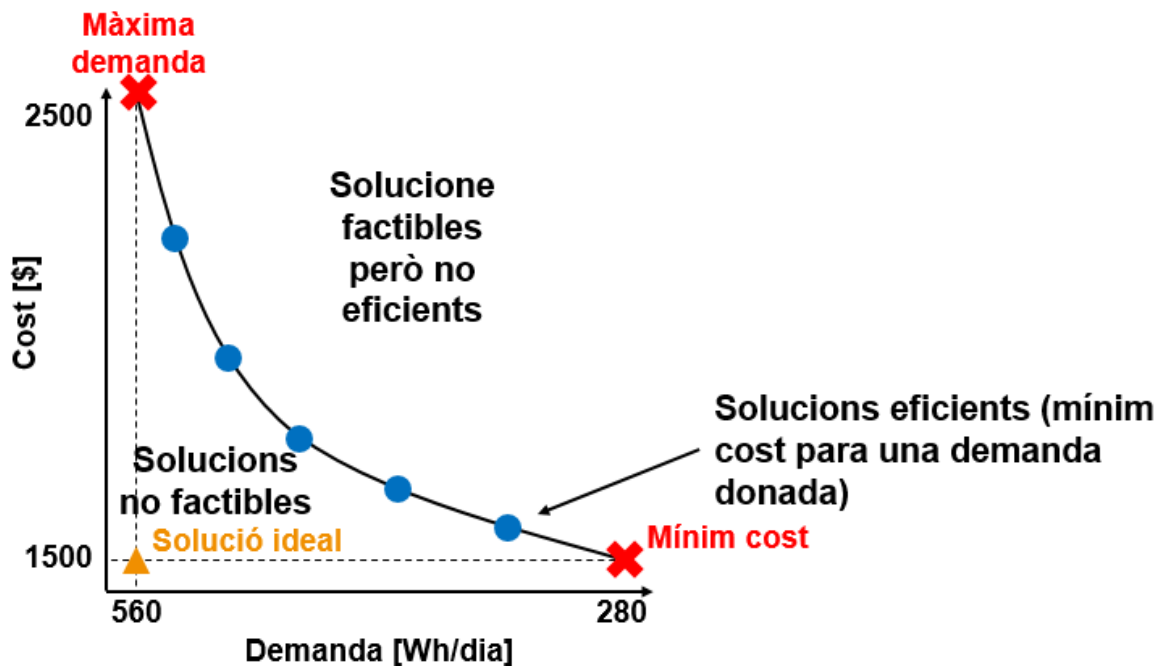


Figura 3. Exemple d'aplicació de la programació compromís. Adaptat de "Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales", de Bruno Domenech Lega.

Les solucions eficients, representades a la Figura 3 com la corba, són aquelles que minimitzen el cost per una certa demanda. A més, com que en el nostre problema no es té un conjunt infinit d'alternatives sinó aquelles que s'hagin generat, les solucions eficients seran certs punts sobre la corba. L'espai superior representa aquells punts que són possibles però amb un cost superior al mínim per aquella demanda, per tant no eficients, i l'espai inferior representa aquelles alternatives que no són factibles ja que el cost és menor al mínim possible per aquella demanda.

Es defineix un punt teòric, el de la solució ideal, que consisteix en considerar el mínim cost i la màxima demanda a la vegada.

La millor solució serà aquella solució eficient (punts pertanyents a la corba) que més a prop

estigui de la solució ideal. Per trobar-la, es resol un model matemàtic que minimitza una funció L_p , on p és la mètrica.

La mètrica representa la importància que se li assigna a la desviació respecte l'ideal de cada criteri. En el cas de L_1 , s'assigna una importància proporcional als pesos, i en el cas de L_∞ és l'extrem oposat, que mesura la màxima desviació. En aquesta metodologia s'ha decidit prendre una combinació lineal de L_1 i L_∞ :

$$\alpha \cdot L_1 + (1-\alpha) \cdot L_\infty \quad (\alpha=0,5)$$

Aquest nou paràmetre, doncs, serà el que definirà distància de cada punt respecte l'ideal i, per tant, la classificació de les diferents alternatives.

6. Aplicació del software

En el marc del projecte per l'electrificació de zones rurals en l'Amèrica Llatina, s'ha dut a terme un programa que realitza la seva metodologia, i que és el resultat de la feina conjunta entre programadors i l'autor d'aquest treball. L'autor va entrar al projecte quan el programari ja estava iniciat, i hi va participar en diferents àmbits: va ajudar a treballar la interfície del programa, participant en la definició de la seva visualització, i a verificar el correcte funcionament d'aquest, detectant i corregint errors que es donaven.

En aquest capítol s'explicarà el funcionament d'aquest programa, seguint tots els passos que ha de realitzar l'usuari per utilitzar-lo, així com l'obtenció dels diferents resultats i la forma com interpretar-los. La validació d'aquest es farà al capítol 7 (Cas d'estudi exemplificat), un cop ja s'hagi exposat com funciona.

Així doncs, el programa parteix del punt de la introducció de les dades de la comunitat, que s'hauran obtingut en la primera etapa d'avaluacions inicials. A partir d'aquestes dades i de les restriccions que ha d'anar indicant l'usuari, el programa genera els diferents nivells. Cada cop que hi ha un nivell, l'usuari pot modificar els pesos dels criteris i subcriteris segons com convingui per analitzar les solucions. Si en el algun moment l'usuari observa resultats que està obtenint resultats que no li interessin, pot tornar a iniciar aquell nivell o qualsevol anterior.

Durant tot aquest procés, el programa va generant una sèrie de carpetes i d'arxius per tal que, un cop es tanqui el programa, es puguin seguir consultant els resultats de la sessió realitzada.

6.1. Introducció de dades

La primera part del procés correspon a la introducció de dades. En aquesta part es demanen detalls de la població, i dels tipus de sistemes de què es disposa. Totes aquestes dades seran recopilades en l'etapa 1, de les avaluacions.

A l'executar-se l'arxiu *MicrogridOptimizer.exe* s'obre el menú principal d'introducció de dades (Figura 4).

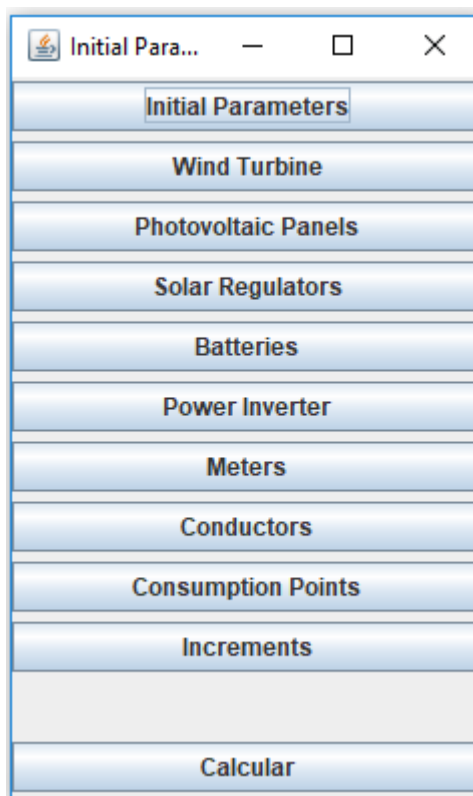


Figura 4. Menú principal d'entrada de dades.

Clicant a les diferents caselles s'accedeix a uns altres submenús, on s'ha d'introduir diverses dades.

A *Initial Parametres* (Figura 5) es demanen uns paràmetres inicials:

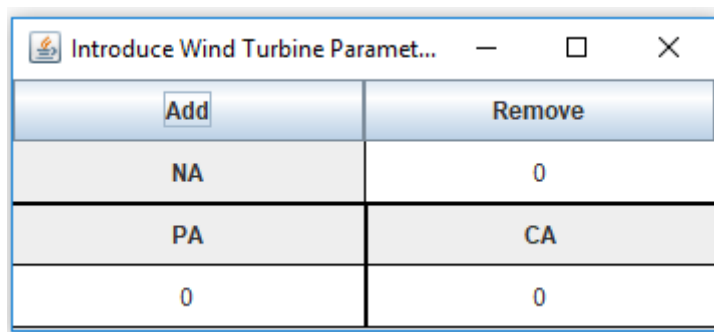
Parameter	Value
FS	0
VN	0
Lmax	0

Figura 5. Submenú de paràmetres inicials

- *FS* és el factor de simultaneïtat. El seu valor s'obté en el l'estudi socioeconòmic, i es calcula com el quocient entre la suma de les potències de les càrregues que es poden connectar simultàniament i la suma de les potències de tots els equips.

- V_N és la tensió nominal [V].
- L_{max} és la distància màxima [m] perquè dos punts es puguin unir directament amb un conductor. Ve determinada per l'usuari depenent de les propietats de la comunitat.

A *Wind Turbine* (Figura 6) s'hi demana informació sobre els aerogeneradors:

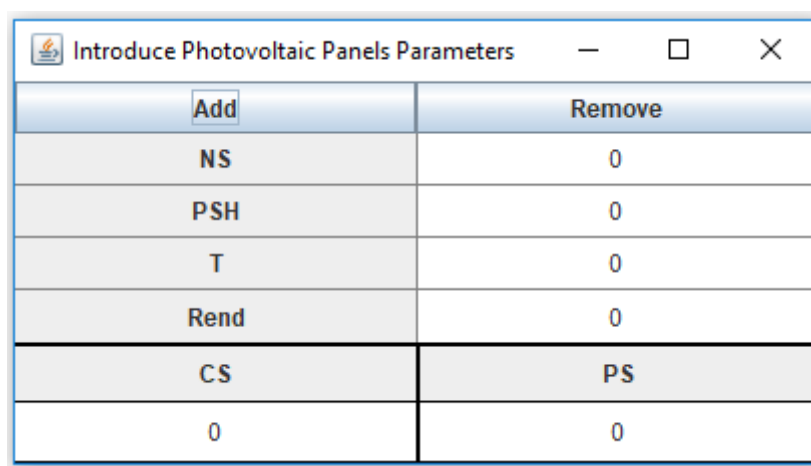


Add	Remove
NA	0
PA	CA
0	0

Figura 6. Submenú de dades dels aerogeneradors

- Cada fila correspon a un tipus d'aerogenerador.
- NA és el nombre màxim d'aerogeneradors que poden ser instal·lats en un punt.
- PA és la potència màxima [W] de l'aerogenerador.
- CA el cost [\$] de l'aerogenerador.

A *Photovoltaic Panels* (Figura 7) s'hi han introdueixen les dades relacionades amb els panells fotovoltàics:

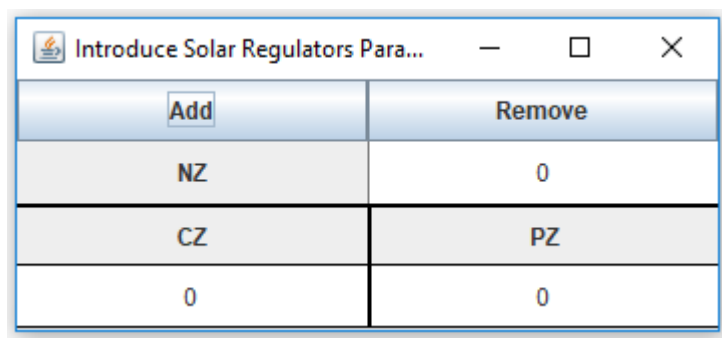


Add	Remove
NS	0
PSH	0
T	0
Rend	0
CS	PS
0	0

Figura 7. Submenú de dades dels panells fotovoltàics.

- Cada fila correspon a un tipus de panell solar.
- *NS* és el nombre màxim de panells fotovoltaics que poden ser instal·lats en un punt.
- *PSH* (peak solar hours) és l'equivalent d'hores al dia amb radiació solar de 1000 W*h/m².
- *T* és la temperatura [°C] diürna de la població.
- *Rend* és el rendiment del panell en funció de la temperatura.
- *CS* és el cost [\$] del panell fotovoltaic.
- *PS* és la potència màxima [W] del panell fotovoltaic.

A *Solar Regulators* (Figura 8) s'hi ha d'introduir les dades relacionades amb els reguladors solars:

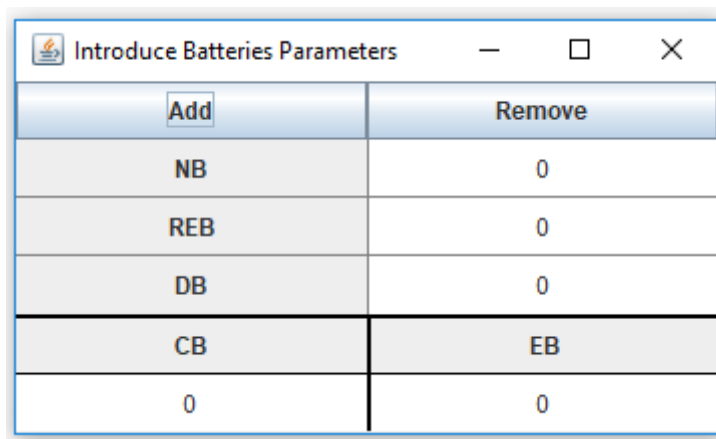


Add	Remove
NZ	0
CZ	PZ
0	0

Figura 8. Submenú de dades dels reguladors solars.

- Cada fila correspon a un tipus de regulador solar.
- *NZ* és el màxim nombre de reguladors solars que poden ser instal·lats en un punt.
- *CZ* és el cost [\$] del regulador solar.
- *PZ* és la potència màxima [W] del regulador solar.

A *Batteries Parameters* (Figura 9) la informació sobre les bateries:

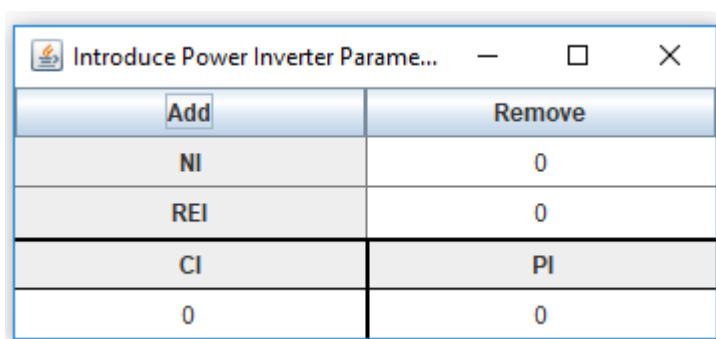


Add	Remove
NB	0
REB	0
DB	0
CB	EB
0	0

Figura 9. Submenú de dades de les bateries

- Cada fila correspon a un tipus de bateria.
- *NB* és el número màxim de bateries que poden ser instal·lades en un punt.
- *REB* és el rendiment de les bateries.
- *DB* és el factor de descàrrega de les bateries.
- *CB* és el cost [\$] de la bateria.
- *EB* és la capacitat equivalent [Wh] de la bateria.

A *Power Inverter* (Figura 10) la informació sobre els inversors:



Add	Remove
NI	0
REI	0
CI	PI
0	0

Figura 10. Submenú de dades dels inversors

- Cada fila correspon a un tipus d'inversor.
- *NI* és el número màxim d'inversors que poden ser instal·lats en un punt.

- REI és l'eficiència de l'inversor de potència.
- CI és el cost [\$] de l'inversor de potència.
- PI és la potència màxima [W] de l'inversor de potència.

A *meters*, (Figura 11) dels mesuradors:

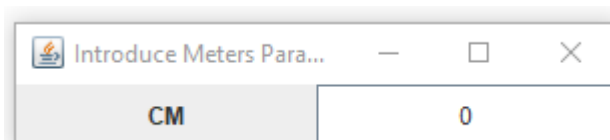
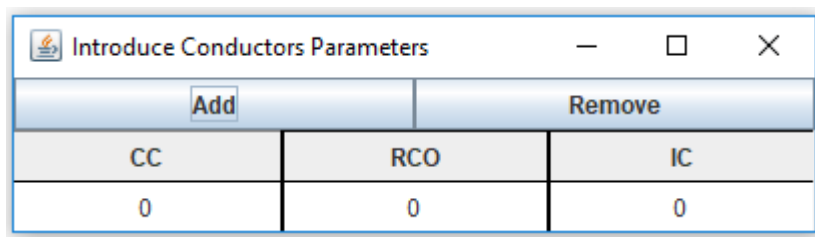


Figura 11. Submenú de dades dels mesuradors

- CM és el cost [\$] d'un mesurador.

A *Conductors Parameters* (Figura 12) dades relacionades amb els conductors que formen la xarxa:



CC	RCO	IC
0	0	0

Figura 12. Submenú de dades dels conductors

- Cada fila correspon a un tipus de conductor.
- CC és el cost [\$/metre] del cable.
- RCO es la resistència elèctrica [Ohm/metre] del cable.
- IC es la màxima intensitat [A] admissible del cable.

A *Consumption Points* (Figura 13) s'hi demana les coordenades de cada punt que es vulgui alimentar així com altres dades d'aquest. Sabent que cada fila correspon a un punt:

Add			Remove							
x	y	z	T1	T2	T3	T4	T5	EDR	PD	DA
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 13. Submenú de dades dels punts

- Cada fila correspon a un punt.
- x, y, z son las coordenades del punt en utm (Universal Transverse Mercator).
- T1, T2, T3... són l'energia generada per l'aerogenerador 1, 2, 3... per al punt.
- EDR és la demanda d'energia [Wh/dia] del punt.
- PD és la demanda de potència [W] del punt.
- DA és l'autonomia [dies] de les bateries. La dada només s'ha d'introduir una vegada i ja és considerada igual per a tots els punts.

Finalment, a *Increments* (Figura 14) s'ha de determinar aquells increments de demanda d'energia, demanda de potència i autonomia amb què volem que es facin els càlculs, a part de amb els valors indicats anteriorment, i per tant es generin les diferents alternatives pel nivell 1. Això és útil per veure com varia el cost en funció d'incrementar els valors d'aquestes demandes.

Add	Remove	
Energy Increment	Power Increment	Autonomy increment
0	0	0

Figura 14. Submenú d'increments pel nivell 1.

Energy increment, *Power Increment* y *Autonomy increment* són els valors dels increments de demanda d'energia, de potència i autonomia [tant per u] amb què es vol fer els càlculs.

Al clicar *Calcular*, apareixen una sèrie de línies de text al terminal i s'obre un arxiu Excel (*Multi.xls*) on apareixen totes les dades introduïdes fins al moment. Es pot comprovar que les dades siguin les correctes i, un cop confirmat, s'ha de guardar el document, anar al terminal i clicar la tecla enter perquè es generin els resultats del primer nivell.

6.2. Nivell 1

6.2.1. Pantalla de resultats

Un cop executat, s'obre la pantalla amb els resultats del nivell 1 (Figura 15).

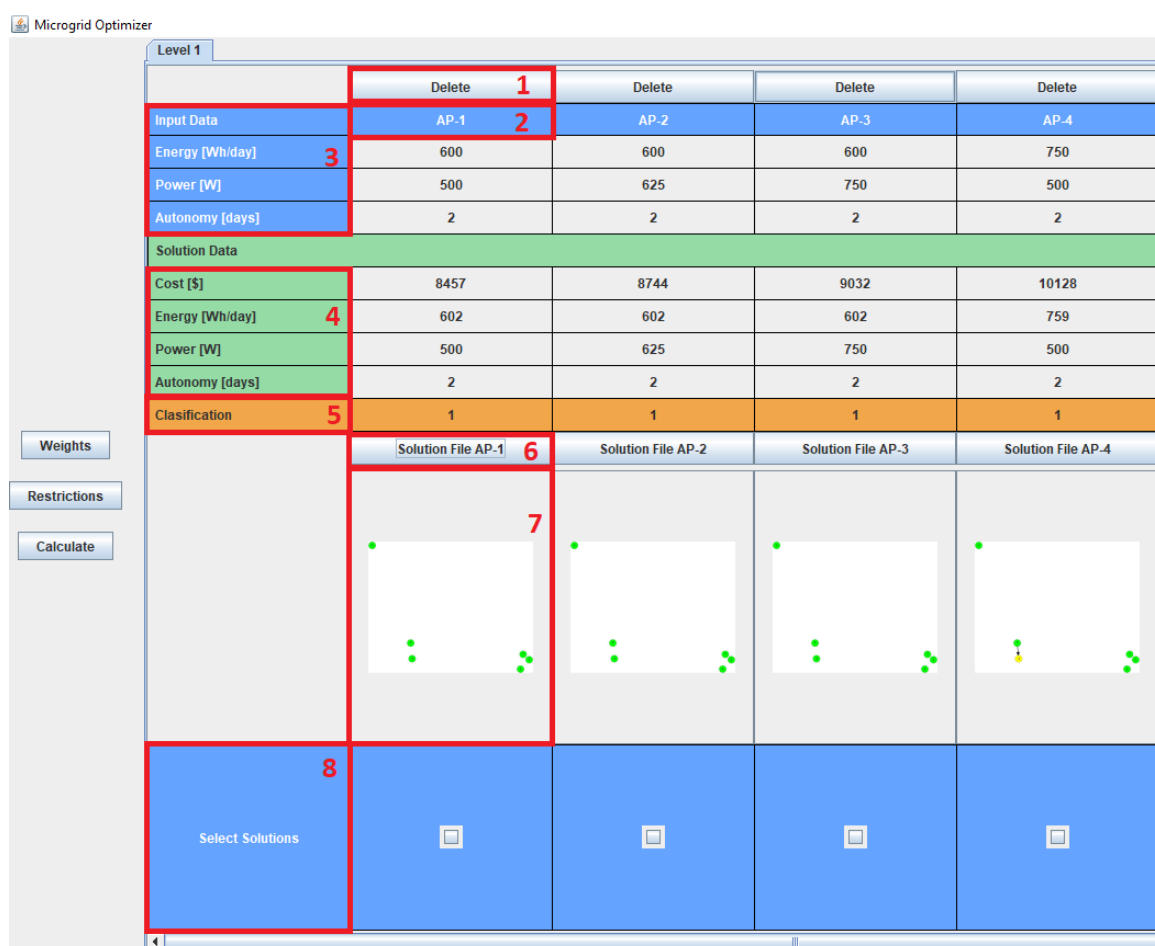


Figura 15. Pantalla de resultats del nivell 1.

Cada columna correspon a una alternativa. Si es vol eliminar una alternativa perquè les seves dades no interessin, es pot clicar a *Delete* (1) i la columna s'eliminarà. Això podria interessar en el cas en què, per exemple, pels valors d'entrada d'una alternativa concreta, s'obté un cost massa elevat que queda fora del pressupost.

Els noms de les alternatives (2) són AP-1, AP-2, AP-3... i estan ordenades de forma que primer surten les solucions obtingudes primer amb els valors originals i després amb els valors aplicant-hi increments. El nombre d'alternatives generades correspon a totes les combinacions possibles amb els valors inicials decidits de demandes d'energia, potència i autonomia i els generats amb els increments d'aquests.

A continuació s'indiquen els valors d'entrada pels atributs de l'alternativa corresponent (3), *Energy [Wh/day]*, *Power [W]* i *Autonomy [days]*. Sempre s'indiquen en referència al primer punt que s'ha introduït al menú de paràmetres inicials.

Seguidament, els resultats per aquesta alternativa (4). *Cost [\$]* és el cost que tindria realitzar l'operació que representa aquesta alternativa. *Energy [Wh/day]* i *Power [W]* són l'energia i potència que serien realment subministrades al punt i *Autonomy [days]* la dada real de l'autonomia.

A la fila *classification* (5) apareix un rànkig ordenant les diferents alternatives. Per modificar aquest rànkig, cal clicar *Weights* (Figura 16), on s'ha d'introduir els pesos desitjats a cada factor. Inicialment apareixen els pesos predeterminats. Com s'ha comentat al punt 5.2.2, aquests s'han determinat a través d'enquestes a diferents especialistes i resulten un bon punt de partida.

Weights Level 1			
Cost	0.48	Cost	0.99
Demand	0.52	Energy	0.39
		Power	0.32
		Autonomy	0.28
<input type="button" value="Calculate"/>			

Figura 16. Distribució de pesos del nivell 1.

Com ja s'ha explicat, en el primer nivell s'enfronten els criteris de cost i demanda. Concretament, s'analitza l'efecte que tenen en el cost diferents valors dels consums d'energia, de potència i autonomia. Així, en la primera columna (Figura 16), es reparteixen els pesos entre el Cost i la Demanda, segons interressi a l'usuari donar més importància a un factor o a un altre. Els dos valors han de sumar 1. En la segona columna, entre Energia, Potència i Autonomia. Els coeficients també han de sumar 1. Aquesta suma apareix directament a Cost. Un cop els valors estan assignats, *Calculate* i el rànking es modifica.

Tornant a la pantalla de resultats del nivell 1, *Solution File* (6) obre una carpeta amb totes les dades de l'alternativa seleccionada.

Les imatges que apareixen a continuació (7) representen la distribució de la xarxa en cada cas. Els punts verds són punts de generació i els punts grocs representen punts que s'abasteixen d'alguna microxarxa.

Finalment, es seleccionen les alternatives (8) amb les quals es vol seguir treballant per passar al nivell 2. L'usuari en pot triar una o més d'una. Si en tria més d'una pot, després, tractar les alternatives generades com problemes diferents i acabar seleccionant-ne una d'elles, o fer-ho com si fossin un mateix problema i generar un conjunt global d'alternatives unint els dos subconjunts.

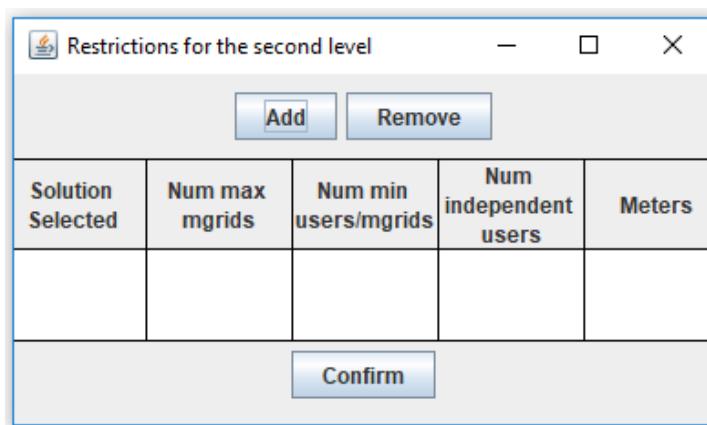
6.2.2. Creació d'un nou nivell 1

Si, un cop ja generat un nivell 1, se'n vol crear un de nou, l'únic que cal fer és modificar les dades desitjades al menú principal d'entrada de dades i clicar *Calcular* sense tenir cap arxiu Excel obert. El nou nivell 1 portarà per nom Level 1-R1, i la numeració de les alternatives començarà a partir de l'última obtinguda a l'anterior nivell 1.

Aquesta opció pot interessar a l'usuari en el cas que, per exemple, no s'hagi obtingut cap alternativa en el rang de costos esperat, o que es cregui que modificant algun dels increments de la demanda es poden trobar alternatives més satisfactòries.

6.2.3. Execució del nivell 2

En primer lloc cal seleccionar a la pantalla de resultats del nivell 1 les alternatives a partir de les quals es desitgen generar les noves alternatives del nivell 2. A continuació, a *Restrictions* (Figura 17) es demanen les restriccions relacionades amb les microxarxes per avançar al nivell 2.



Solution Selected	Num max mgrid	Num min users/mgrid	Num independent users	Meters

Figura 17. Restriccions per executar el nivell 2.

A *Solution Selected* s'ha d'escriure el nom de les alternatives seleccionades a les quals es vol aplicar les restriccions que es descriuran a continuació. Si es volen aplicar les mateixes restriccions a totes les alternatives, es pot escriure All.

A *Num max mgrid* s'ha d'indicar el número màxim de microxarxes que es desitja que siguin possibles obtenir en la nostra alternativa.

A *Num min users/mgrids*, el número mínim de usuaris per microxarxa.

A *Num independent users*, el número màxim d'usuaris individuals.

A *meters*, s'ha d'escriure *All* si es vol que es contempli la possibilitat que hi hagi mesuradors en tots els usuaris a part de en les microxarxes. L'opció que qualsevol d'aquests paràmetres sigui lliure serà considerada automàticament pel programa sense necessitat de ser indicada.

Finalment, *Confirm* i *Calcular* a la pantalla de resultats del nivell 1 sense tenir cap arxiu Excel obert.

6.3. Nivell 2

6.3.1. Pantalla de resultats

Un cop executat, s'obre la finestra amb la pantalla de solucions del segon nivell (Figura 18).

Igual que al nivell 1, cada columna correspon a una alternativa i si es vol eliminar una alternativa perquè les seves dades no interessin, es pot clicar a *Delete* (1). Això podria interessar en el cas en què, per exemple, pels valors d'entrada d'una alternativa concreta, s'obté una configuració de la xarxa que no interessa.

Els noms de les alternatives (2) són AP-X.1, AP-X.2, AP-X.3, sent AP-X el nom de les opcions del nivell 1 amb la qual s'ha generat aquesta alternativa del nivell 2.

A continuació s'indiquen els valors d'entrada pels atributs per la corresponent (3). *Num mgrids* és el número màxim de microxarxes possibles en aquesta alternativa, *Num users/mgrids* el número mínim de usuaris per microxarxa., *Num independent users* el número màxim d'usuaris individuals i *meters* indica *All* si hi ha la possibilitat que hi hagi mesuradors en tots els usuaris a part de en les microxarxes.

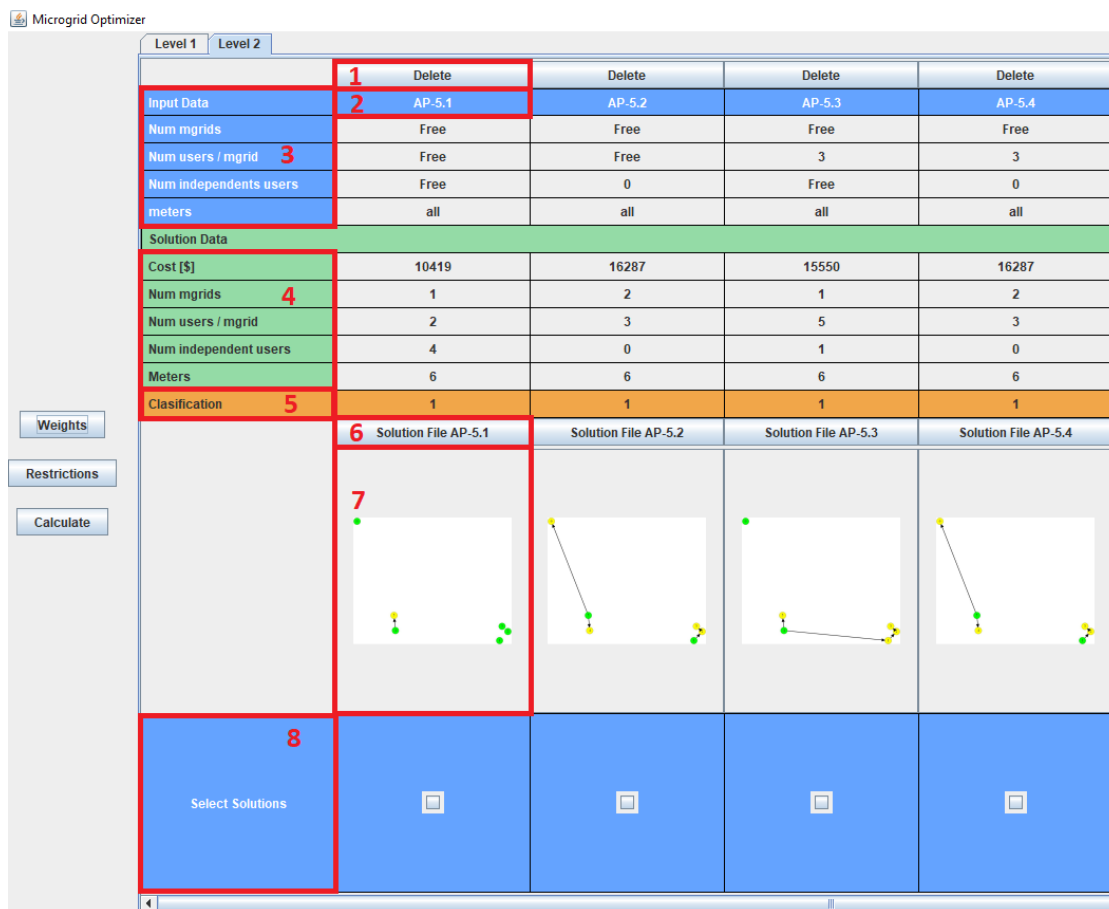


Figura 18. Pantalla de resultats del nivell 2.

Seguidament, els resultats per aquesta alternativa (4). *Cost [\$]* és el cost de l'operació. *Num mgrid*, *Num users/mgrid*, *Num independent users* i *meters* indiquen els valors reals obtinguts en aquesta alternativa.

A la fila *classification* (5) apareix de nou el rànkings de les alternatives. Per modificar-lo, a *Weights* (Figura 19) s'han d'assignar els pesos. Inicialment apareixen els pesos predeterminats. Com s'ha comentat al punt 5.2.2, aquests s'han determinat a través d'enquestes a diferents especialistes i resulten un bon punt de partida.

Weights Level 2			
Cost	0.48	Cost	1.0
Managment of the System	0.52	Num mgrid	0.24
		Num users / mgrid	0.36
		Num independent users	0.4
		Meters	0.0
<input type="button" value="Calculate"/>			

Figura 19. Distribució de pesos del nivell 2.

En el segon nivell s'enfronten els criteris cost i gestió del sistema. Concretament, s'estudia la influència sobre el cost de modificar diferents valors inclosos en la gestió del sistema. Així, a la primera columna es reparteixen els pesos segons convingui a l'usuari, entre *Cost* i *Managment of the System*, la gestió del sistema. La suma d'ambdós valors ha de ser 1. A la segona columna, entre *num mgrid*, *num users/mgrid*, *num independent users* i *meters*. La suma també ha de ser 1 i apareix directament a *Cost*. *Calculate* farà que el rànking sigui modificat.

Tornant a la pantalla de resultats, *Solution File* (6) porta a la carpeta amb els resultats de l'alternativa en qüestió.

A continuació apareixen les imatges (7) de la distribució de la xarxa en cada cas.

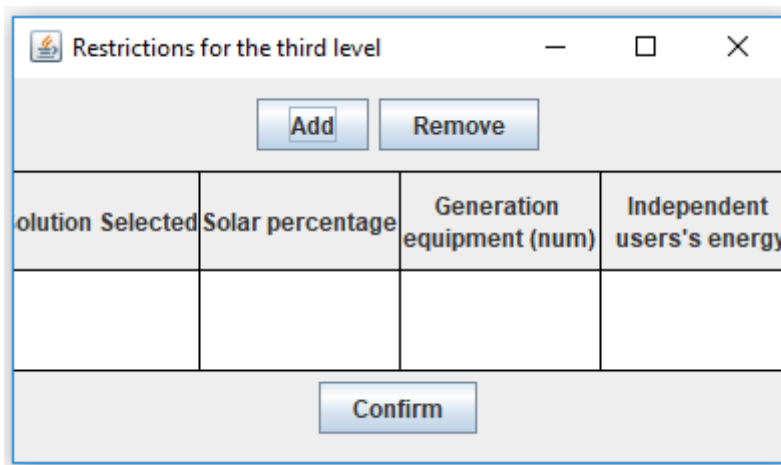
Finalment, es poden seleccionar aquelles alternatives (8) a partir de les quals es voldrà generar el nivell 2. L'usuari en pot triar una o més d'una. Si en tria més d'una pot, després, tractar les alternatives generades com problemes diferents i acabar seleccionant-ne una d'elles, o fer-ho com si fossin un mateix problema i generar un conjunt global d'alternatives unint els dos subconjunts.

6.3.2. Creació d'un nou nivell 2

Si es desitja crear un nou nivell 2, simplement cal tornar al punt anterior des d'on es vol començar. Si és a partir del nivell 1, es torna a la pantalla dels resultats i es seleccionen les alternatives i les restriccions amb les quals es vol realitzar el nivell 2. Si és des de l'inici, es torna al menú principal per a generar un nou nivell 1.

6.3.3. Execució del nivell 3

En la pantalla de resultats del nivell 2, cal seleccionar aquelles alternatives a partir de les quals es vol realitzar el nivell 3. A continuació, a Restrictions (Figura 20), s'ha d'indicar les restriccions per a tenir en compte per les solucions del nivell 3.



Solution Selected	Solar percentage	Generation equipment (num)	Independent users's energy

Figura 20. Distribució de pesos pel nivell 3.

A la primera columna, Solution Selected, escriure All si se volen aplicar las mateixes restriccions a totes las alternatives seleccionades. Si no es així, indicar el nombre de l'alternativa.

A solar percentage, el mínim percentatge d'energia generada pels panells fotovoltaics.

A generation equipment (num), el número mínim d'equips de generació per punt de generació.

A independent users's energy, el màxim percentatge d'energia en usuaris individuals en front a usuaris en microxarxa.

Igual que amb el nivell 1, l'opció que qualsevol d'aquests elements sigui lliure serà també

considerada automàticament pel programa sense necessitat d'indicar-se.

Finalment, Calculate a la pantalla de solucions del nivell 2 executa el nivell 3.

6.4. Nivell 3

6.4.1. Pantalla de resultats

Un cop executat, s'obre la finestra amb la pantalla de resultats del tercer nivell (Figura 21).

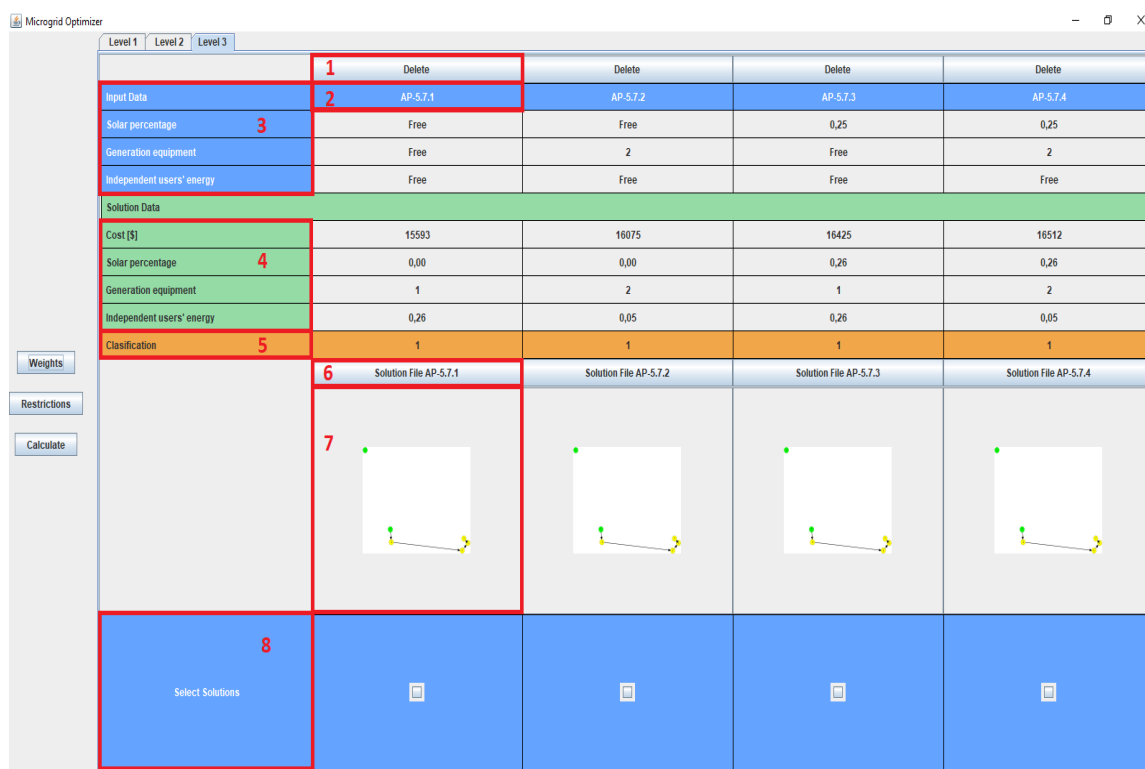


Figura 21. Pantalla de resultats del nivell 3.

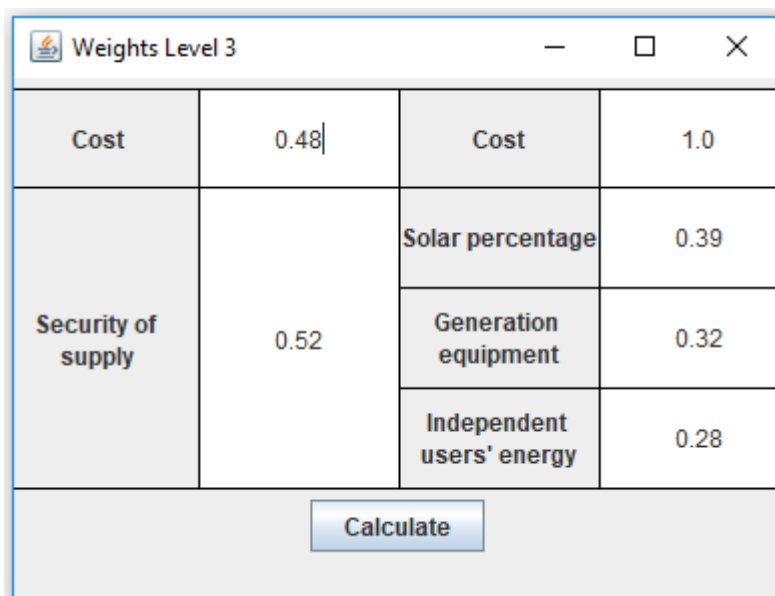
D'igual forma que als altres nivells, cada columna correspon a una alternativa. Per eliminar una alternativa, es pot clicar a *Delete* (1) i la columna s'elimina. Això podria tornar a interessar en el cas en què, per exemple, pels valors d'entrada d'una alternativa concreta, s'obté un cost massa elevat que queda fora del pressupost.

Els noms de les alternatives (2) són AP-X.Y.1, AP-X.Y.2, AP-X.Y.3..., sent AP-X-Y el nom de les opcions del nivell 2 amb les quals s'ha generat aquesta alternativa del nivell 2.

A continuació s'indiquen els valors d'entrada pels atributs per l'alternativa corresponent (3). *Solar percentage* és el mínim percentatge del total d'energia que es vol que sigui generada mitjançant panells solars, *Generation equipment* el número mínim d'equips en cada punt de generació i *Independent users energy* el màxim percentatge d'energia en usuaris individuals en front a usuaris en microxarxa.

Seguidament, els resultats per aquesta alternativa (4). *Cost* [\$] és el cost de l'operació. *Solar percentage*, *Generation equipment* i *Independent users energy* indiquen els valors reals obtinguts en aquesta alternativa.

A la fila *classification* (5) apareix de nou el rànkings de les alternatives. Per modificar-lo, a *Weights* (Figura 22) s'han d'assignar els pesos. Inicialment apareixen els pesos predeterminats. Com s'ha comentat al punt 5.2.2, aquests s'han determinat a través d'enquestes a diferents especialistes i resulten un bon punt de partida.



Weights Level 3			
Cost	0.48	Cost	1.0
Security of supply	0.52	Solar percentage	0.39
		Generation equipment	0.32
		Independent users' energy	0.28
<div>Calculate</div>			

Figura 22. Distribució de pesos del nivell 3.

En el tercer nivell, s'enfronten el cost i la seguretat del subministrament. Concretament, la influència sobre el cost de modificar el valor d'alguns criteris de la seguretat del subministrament. Així, la primera columna es reparteixen els pesos segons convingui a l'usuari, entre Cost i Security of supply, la seguretat del subministrament. La suma dels dos valors ha de ser 1. A la segona columna, Solar percentage, Generation equipment i

Independent users energy també han de sumar 1 i apareix directament a Cost. *Calculate* farà que el rànking sigui modificat.

Tornant a la pantalla de resultats, *Solution File* (6) obre la carpeta amb els resultats de l'alternativa.

A continuació apareixen les imatges (7) de la distribució de la xarxa en cada cas.

6.4.2. Creació d'un nou nivell 3

Si es desitja crear un nou nivell 3, simplement cal tornar al punt anterior des d'on es vol començar. Si és des del nivell 2 o des del nivell 1, es torna a la pantalla dels resultats i es seleccionen les alternatives i les restriccions amb les quals es vol realitzar el nivell 3. Si és des de l'inici, es torna al menú principal per a generar un nou nivell 1.

6.5. Arxius

A banda de les pantalles de resultats, el programa també genera diferents carpetes i arxius. Així, es pot accedir a les alternatives generades i analitzar-les en profunditat encara que ja s'hagi tancat l'aplicació.

6.5.1. Carpetes de les solucions

Per cada alternativa generada, es crea una carpeta de nom *SX_AP-DY*, sent *X* 0 si és la primera vegada que executem el programa i per tant la primera sèrie de solucions, 1 si és la segona... i *Y* el número de l'alternativa del nivell 1. Per exemple, *S2_AP-D5* és la carpeta que conté els arxius de la cinquena alternativa en la tercera vegada que s'executa el programa.

Dins d'aquesta carpeta hi ha diferents arxius referents a aquesta solució. A més, si s'ha realitzat un nivell 2 a partir d'aquesta alternativa, les noves carpetes creades per les alternatives del nivell 2 també hi apareixeran. D'igual forma, les carpetes amb informació referent a les alternatives de nivell 3 apareixeran dins la carpeta de l'alternativa de nivell 2 a partir de la qual han estat creades. Cal destacar que, als nivells 2 i 3, les carpetes de les alternatives porten per nom només un número, i el de la primera alternativa es crea amb un 0, per tant no correspon el número de l'alternativa amb el de la carpeta creada. Per exemple, per anar a buscar la carpeta de l'alternativa AP-3.8.3, hauríem d'entrar primer a la carpeta

SX_AP-D3, dins d'aquesta a la carpeta 7 i finalment dins la 2.

Un arxiu interessant és el *Resolucion_heuristica_nivelX* (Figura 23).

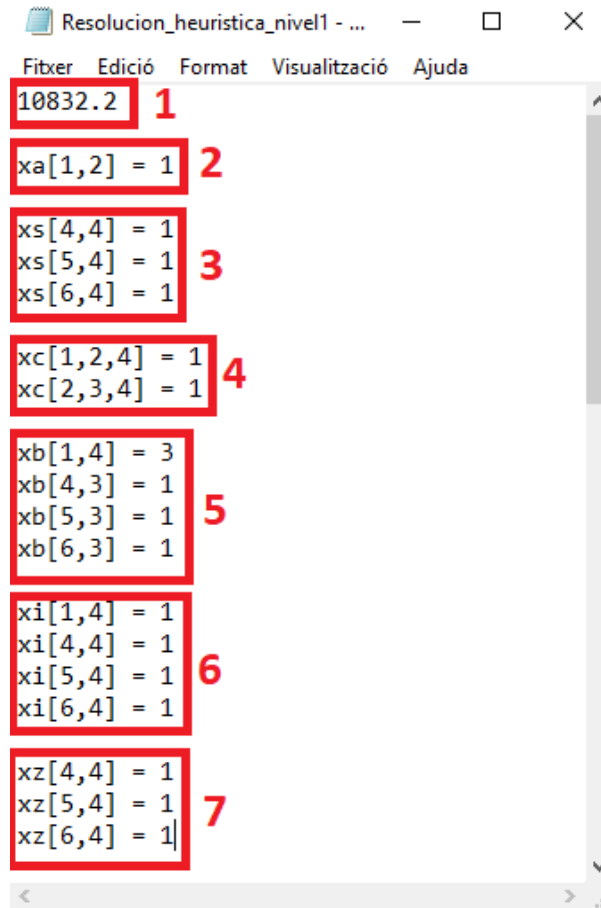


Figura 23. Arxiu *Resolucion_heuristica_nivel1*

En aquest, s'hi indica:

- En la primera fila, el cost de l'alternativa (1).
- $xa[u,t]$ (2) indica el nombre aerogeneradors del tipus t que s'han d'instal·lar al punt u .
- $xs[u,t]$ (3) indica el nombre de panells solars del tipus t que s'han d'instal·lar al punt u .
- $xc[u,p,t]$ (4) indica que hi ha un cable del tipus t entre els punts u i p .
- $xb[u,t]$ (5) indica el nombre de bateries del tipus t que s'han d'instal·lar al punt u .

- $xi[u,t]$ (6) indica el nombre d'inversors del tipus t que s'han d'instal·lar al punt u . Cal destacar que, als nivells 1 i 2, aquest valor pot ser decimal.
- $xz[u,t]$ (7) indica el nombre de reguladors del tipus t que s'han d'instal·lar al punt u .

6.5.2. Documents Excel

Cada cop que es genera un nou nivell, es crea un arxiu Excel (.xls) amb les dades corresponents. El seu nom és SX_MulticritY, on X indica de nou si és el primer cop, el segon... que s'executa el programa i Y quin ha estat el nivell realitzat. Per exemple, S1_Multicrit2 és l'arxiu Excel creat al finalitzar el nivell 2 de la segona sessió que s'executa el programa. Si ja s'ha realitzat un cert nivell però es decideix tornar a generar el mateix, el nom de l'arxiu Excel creat per aquest nou nivell és SX_MulticritY_NYRZ, sent Z 1 si és el primer nou nivell Y, 2 si el segon...

Aquest arxiu compte amb quatre pestanyes: *Level 1*, *Level 2*, *Level 3* i *Datos*, corresponents a cadascun dels nivells i a les dades inicials. Les tres primeres estan complertes si aquell nivell ja s'ha executat. Per exemple, en l'arxiu creat al realitzar-se un nivell 3, les pestanyes *Level 1* i *Level 2* es troben igualment complertes, però en l'arxiu creat al realitzar-se un nivell 2, la pestanya *Level 3* es troba buida.

A la pestanya *Datos* (Figura 24) hi ha totes aquelles dades entrades en el menú inicial d'introducció de dades del programa. Pot ser útil per detectar possibles errors.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				

Figura 24. Arxiu Multicrit, pestanya Datos.

A les pestanyes *Level 1*, *Level 2* i *Level 3* s'hi pot trobar la informació que apareixia també a les pantalles de resultats, però s'hi mostren també algunes de dades nous que convé comentar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2									Input data	AP-1
3									Energy [Wh/day]	600
4									Power [W]	500
5									Autonomy [days]	2
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										

Figura 25. Arxiu Multicrit, pestanya Nivell1.

En aquest exemple d'un nivell 1 (Figura 25), s'observa una columna per la primera alternativa AP-1, amb les dades d'entrada (1) i les dades reals de l'alternativa (2). A continuació (3), apareixen dues variables noves, *L1* i *Linf*, que s'utilitzen a l'hora de decidir la classificació de cada alternativa, i seguidament la classificació. També hi ha la taula dels pesos (4) i dues variables, *Ideal* i *Antiideal*, que s'utilitzen per fer el rànquing. Finalment, hi ha una taula amb les restriccions (5) que s'han pres per fer el segon nivell. Les pestanyes dels nivells 2 i 3 són molt similars, amb les dades corresponents d'aquestes ja comentades anteriorment.

7. Cas d'estudi exemplificat

Finalment, es decideix realitzar un cas d'exemple de l'electrificació d'una població mitjançant el programa, seguint els passos descrits al punt 8. Així, es vol fer un cas il·lustratiu i demostrar que el programa funciona correctament.

Cal explicar que les decisions que s'han pres s'han realitzat amb l'objectiu que l'exemple sigui el més il·lustratiu possible i no de forma realista. És a dir, les diferents restriccions que s'han considerat, els pesos assignats i les solucions amb què s'ha anat avançant de nivell s'han decidit amb l'objectiu d'obtenir alternatives que puguin resultar interessants, no d'obtenir el millor resultat possible.

7.1. Entrada de dades

En primer lloc s'introdueixen les dades inicials de la població i dels sistemes:

- El factor de simultaneïtat (FS) 1, el voltatge nominal (VN) 220V i la longitud màxima entre punts per poder connectar-los amb un conductor (Lmax) 1500m.
- El nombre màxim d'aerogeneradors que poden ser instal·lats en un punt (NA) és 3, i es disposa de quatre tipus d'aerogeneradors diferents, de cost (CA) 1139, 3022, 4447,5 i 5644,9\$, i potència (PA) 300, 1200, 1750 i 3500W respectivament.
- El nombre màxim de panells fotovoltaics que poden ser instal·lats en un punt (NS) és 40, l'equivalent d'hores al dia amb radiació solar de 1000 W*h/m² (PSH) de 4,3, la temperatura (T) 8°C i el rendiment el funció de la temperatura (Rend) 1,01. Es disposa de 4 tipus de panells fotovoltaics diferents, de cost (CS) 451, 636, 821 i 1000\$, i potència (PS) 50, 75, 100 i 150W respectivament.
- El nombre màxim de reguladors que poden ser instal·lats en un punt (NZ) és 40, i es disposa de quatre tipus de reguladors diferents, de cost (CZ) 67, 81, 95 i 125\$ i potència (PZ) 50, 75, 100 i 200W respectivament.
- El nombre màxim de bateries que poden ser instal·lades en un punt (NB) és 30. El rendiment de les bateries (REB) és 0,85, i el factor de descàrrega de les bateries (DB)

0,6. Es disposa de quatre tipus de bateries diferents, de cost (CB) 225, 246, 292,07 i 325\$ i de capacitat equivalent (EB) 1500, 1800, 2400 i 3000Wh respectivament.

- El nombre màxim d'inversors que poden ser instal·lats (NI) és 6, i l'eficiència de l'inversor de potència (REI) és 0,85. Es disposa de quatre tipus d'inversors, de cost (CI) 377, 1200, 1800 i 2300\$ i potència (PI) 300, 1200, 2000 i 3000W respectivament.
- El cost dels mesuradors és 50\$.
- Es disposa de 3 tipus de cable diferent, de cost (CC) 4,94, 5,49 i 5,79 \$/metre, resistència elèctrica (RCO) 0,0026, 0,00103 i 0,00016 Ohm/metre i màxima intensitat admissible 64, 118 i 380 A respectivament.
- Hi ha 6 punts per formar part de la xarxa elèctrica. S'introdueixen les seves coordenades x, y i z en utm (Universal Transverse Mercator) i l'energia generada per cada aerogenerador en aquell punt (T1, T2, T3, T4). També són necessàries les dades de la demanda d'energia en cada punt (EDR) en Wh/dia, la demanda de potència en cada punt (PD) en W, i l'autonomia general que desitgem que es tingui (DA), en dies. Aquestes dades es mostren a la Taula 5.

	Coord			EA					DEMANDA		
	x	y	z	T1	T2	T3	T4	T5	EDR	PD	DA
1	3211	867,6	3825,6	832,8	2993,6	5947,2	11891,4	0	600	500	2
2	3299	964	3787,6	700	2513,7	5004,6	9993,1	0	300	200	
3	3237,4	1019,3	3808,8	711,8	2558,8	5094,2	10171,8	0	300	200	
4	2106,6	974,3	3884,9	1195,1	4271,2	8494,1	17020,8	0	300	200	
5	2092	1135	3894,3	1266,6	4527,1	8981,8	18007,7	0	300	200	
6	1700	2135	3794,2	259,4	1012,3	2167	4253,4	0	300	200	

Taula 5. Coordenades, energies generades per cada aerogenerador i demandes en cada punt

Finalment, per tal de realitzar el nivell 1, es decideixen els següents increments:

- 0,25 i 0,5 de la demanda d'energia
- 0,25 i 0,5 de la demanda de potència
- sense increment per la demanda d'autonomia.

7.2. Nivell 1

S'obtenen 9 alternatives pel que fa al nivell 1, corresponents a totes les combinacions possibles entre els diferents valors de demandes d'energia, de potència i d'autonomia. Aquestes es representen en la Taula 6, on apareixen els noms de les alternatives, els valors de les dades d'entrada i les solucions de cadascuna d'aquestes. Cal recordar que els valors de resultats es donen respecte les dades del primer punt que s'ha indicat a l'entrada de dades.

Es procedeix ara realitzar un primer rànkig del nivell 1. Per fer-ho, es decideix assignar uns pesos de 0,5 tant per la demanda com pel cost, donant-li així la mateixa importància als dos factors, i un 0,5 a l'efecte de l'energia i la potència en el cost. Aquest rànkig també es mostra a la Taula 6.

Es decideix, però, que es vol considerar només les tres alternatives que representen cap increment en les demandes (AP-1), un increment de 0,25 en ambdues (AP-5) i un increment de 0,5 també en totes dues (AP-5). D'aquestes 3, la que té un millor rànkig, i la que s'utilitzarà per passar al nivell 2, és l'alternativa AP-5.

Nom alternativa	AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	AP-6	AP-7	AP-8	AP-9
Dades d'entrada									
Demanda d'energia mínima [Wh/dia]	600	600	600	750	750	750	900	900	900
Demanda de potència mínima [W]	500	625	750	500	625	750	500	625	750
Autonomia mínima [dies]	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Solucions reals									
Cost [\$]	8457	8744	9032	10128	10419	10711	10832	11127	11423
Energia generada [Wh/dia]	602	602	602	759	759	759	941	941	841
Potència generada [W]	500	625	750	500	625	750	500	625	750
Autonomia [dies]	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Rànkings	5	2	1	8	4	3	9	7	5

Taula 6. Alternatives generades al nivell 1.

Si s'observa el gràfic de distribució de la xarxa d'aquesta solució (Figura 26), es veu que els punts 1, 2, 3 i 6 són usuaris individuals i, per tant, també punts de generació. Els punts 4 i 5 formen una microxarxa en què el punt 4 és de generació i abasteix al 5.

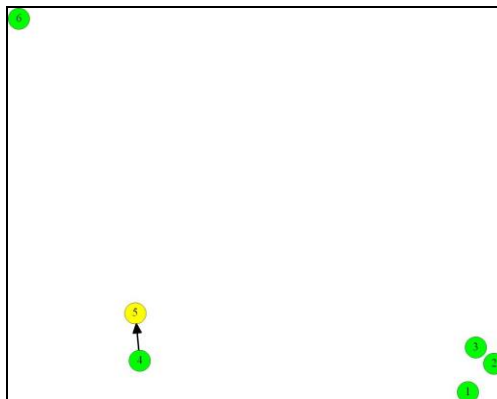


Figura 26. Distribució de la xarxa per la millor alternativa al nivell 1.

Per analitzar aquesta alternativa amb més detall, s'entra a la carpeta S0_AP-D5 i s'estudia l'arxiu *Resolucion_heuristica_nivel1* (Figura 27).

```
Resolucion_heuristica_nivel1 - Llibreta
Fitxer Edició Format Visualització Ajuda
10419.2

xa[1,1] = 1
xa[5,1] = 1

xs[1,1] = 1
xs[2,4] = 1
xs[3,4] = 1
xs[6,4] = 1

xc[5,4,4] = 1

xb[1,2] = 2
xb[2,2] = 1
xb[3,2] = 1
xb[5,1] = 1
xb[5,3] = 1
xb[6,2] = 1

xi[1,4] = 1
xi[2,4] = 1
xi[3,4] = 1
xi[5,4] = 1
xi[6,4] = 1

xz[1,4] = 1
xz[2,4] = 1
xz[3,4] = 1
xz[6,4] = 1
```

Figura 27. Detalls de l'alternativa al nivell 1

D'aquest se n'extreu que:

- El cost de l'alternativa és de 10419,2\$
- Hi ha un aerogenerador de tipus 1 situat al punt 1, i un de tipus 1 al punt 5.
- Hi ha un panell fotovoltaic de tipus 1 situat al punt 1, i un del tipus 4 al punt 2, al punt 3 i al punt 6.
- Hi ha un cable del tipus 4 que uneix els punts 5 i 4.
- Hi ha dues bateries de tipus 2 al punt 1, una del tipus 2 al punt 2 i al punt 3, una del tipus 1 al punt 5, una del tipus 3 al punt 5 i una del tipus 2 al punt 6.
- Hi ha 1 inversor del tipus 4 als punts 1, 2, 3, 5 i 6.
- Hi ha 1 regulador del tipus 4 als punts 1, 2, 3 i 6.

Per passar al nivell 2, es decideix prendre com a restriccions:

- Un número màxim d'1 microxarxa. L'opció de microxarxes sense màxim de microxarxes és considerada de forma automàtica pel programa.
- Un número mínim de 3 usuaris per microxarxa. L'opció de microxarxes sense mínim d'usuari també és considerada automàticament.
- Un número d'usuaris independents de 0. L'opció de tenir usuaris independents és considerada també pel programa.
- Mesuradors en tots els usuaris.

7.3. Nivell 2

S'obtenen, per tant, 8 alternatives pel nivell 2. Aquestes es mostren a la Taula 7 juntament amb el seu nom, les dades d'entrada i les solucions reals. Per ordenar-les, es decideix assignar un pes de 0,67 al manteniment del sistema i de 0,33 al cost, i dins del cost, un 0,3 al número de microxarxes, 0,3 al número d'usuaris per microxarxa, 0,3 al número d'usuaris independents i 0,1 als mesuradors.

Nom alternativa	AP-5.1	AP-5.2	AP-5.3	AP-5.4	AP-5.5	AP-5.6	AP-5.7	AP-5.8
Dades d'entrada								
Número màxim de microxarxes	Free	Free	Free	Free	1	1	1	1
Número mínim d'usuaris per microxarxa	Free	Free	3	3	Free	Free	3	3
Número màxim d'usuaris independents	Free	0	Free	0	Free	0	Free	0
Mesuradors	All	All	All	All	All	All	All	All
Solucions reals								
Cost [\$]	10419	16287	15550	16287	10419	20308	15550	20308
Número de microxarxes	1	2	1	2	1	1	1	1
Número d'usuaris per microxarxa	2	3	5	3	2	6	5	6
Número d'usuaris independents	4	0	1	0	4	0	1	0
Mesuradors	6	6	6	6	6	6	6	6
Rànk	5	7	1	7	5	3	1	3

Taula 7. Alternatives generades al nivell 2.

S'obtenen dues alternatives empatades en el primer lloc del rànking: AP-5.3, AP-5.7.

S'observa que, encara que les dades d'entrada de les dues alternatives siguin diferents, les solucions reals són les mateixes. Això és degut a que aquestes alternatives compleixen totes dues premisses inicials. També es pot veure que el cost de l'alternativa augmenta respecte el nivell 1, un fet lògic ja que cada vegada som més restrictius.

Es decideix treballar amb l'alternativa AP-5.3. El gràfic de la distribució de la xarxa (Figura 28) mostra que efectivament hi ha una única microxarxa formada pels punts 1, 2, 3, 4 i 5 en què el punt 4 és el generador. El punt 6 és un usuari individual.

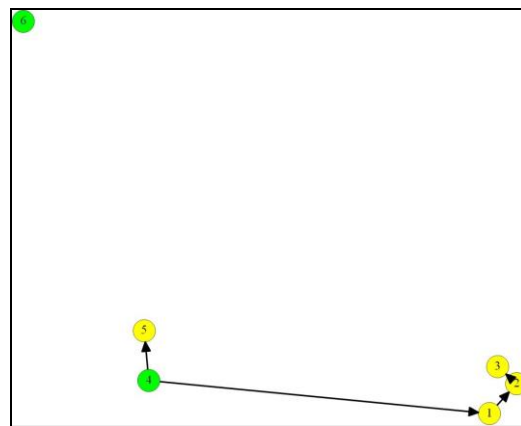


Figura 28. Distribució de la xarxa per la millor alternativa al nivell 2.

Per analitzar aquesta alternativa amb més detall, cal obrir la carpeta S0_AP-5, i dins d'aquesta, la carpeta 2, que és la corresponent a l'alternativa AP-5.3. Cal recordar que, als nivells 2 i 3, la carpeta de la primera alternativa es crea amb un 0, per tant no correspon el número de l'alternativa amb el de la carpeta creada. Un cop dins, sobre l'arxiu *Resolucion_heuristica_nivel2* (Figura 29).

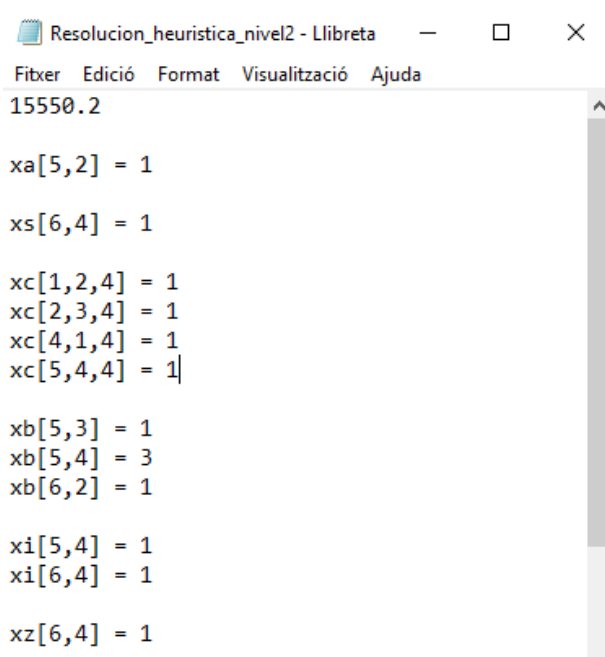


Figura 29. Detalls de l'alternativa al nivell 2.

D'aquest, se n'extreu que:

- El cost de l'alternativa és de 15550,2\$
- Hi ha un aerogenerador de tipus 2 situat al punt 5.
- Hi ha un panell fotovoltaic de tipus 4 situat al punt 6.
- Hi ha cables del tipus 4 que uneixen els punts 1 i 2, els punts 2 i 3, els punts 4 i 1 i els punts 5 i 4.
- Hi ha una bateria del tipus 3 al punt 5, tres bateries del tipus 4 al punt 5 i una bateria del tipus 2 al punt 6.
- Hi ha 1 inversor del tipus 4 als punts 5 i 6.
- Hi ha 1 regulador del tipus 4 al punt 6.

Per realitzar el nivell 3, es decideix prendre com a restriccions:

- Un mínim percentatge de l'energia generada per panells fotovoltaics del 25%. L'opció que aquest percentatge sigui lliure és considerada directament pel programa.

- Un mínim de dos equips de generació per punt de generació. L'opció que el nombre d'equips de generació per punt de generació sigui lliure també és calculada igualment.
- El màxim percentatge d'energia en usuaris individuals en front a microxarxes es deixa lliure.

7.4. Nivell 3

S'obtenen, doncs, quatre alternatives per al nivell 3, representades a la següent taula (Taula 8) juntament amb els seus noms, les dades d'entrada i les solucions reals. Per ordenar-les en el rànking, es distribueixen els pesos de la següent forma: 0,5 pel cost i 0,5 per la seguretat del subministrament, dividint així per parts iguals el valor. Dins del cost, es reparteix un 0,4 al percentatge generat per energia solar, també un 0,4 al mínim d'equips de generació per punt i un 0,2 a l'energia en usuaris individuals.

Nom alternativa	AP-5.3.1	AP-5.3.2	AP-5.3.3	AP-5.3.4
Dades d'entrada				
Tant per u mínim generat per energia solar	Free	Free	Free	Free
Mínim d'equips de generació per punt	Free	Free	2	2
Màxim tant per u d'energia en usuaris individuals	Free	0,4	Free	0,4
Solucions reals				
Cost [\$]	15593	16123	16075	16518
Tant per u mínim generat per energia solar	0,00	0,00	0,00	0,00
Mínim d'equips de generació per punt	1	1	2	2
Màxim tant per u d'energia en usuaris individuals	0,26	0,05	0,26	0,05
Rànking	1	2	4	3

Taula 8. Alternatives generades al nivell 3.

L'alternativa que resulta en primer lloc és la AP-5.3.1. El cost segueix augmentant respecte els anteriors nivells, fet lògic ja que cada cop exigim més factors.

El gràfic de la distribució de la xarxa pel nivell 3 és sempre el mateix que pel nivell 2, ja que en aquest nivell no es fan modificacions respecte la microxarxa.

Per analitzar en detall l'alternativa, s'entra a la carpeta S3_AP-D5, dins d'aquesta a la 2 i dins d'aquesta a la 0. S'obre l'arxiu *Resolucion_heuristica_nivel3* (Figura 30).

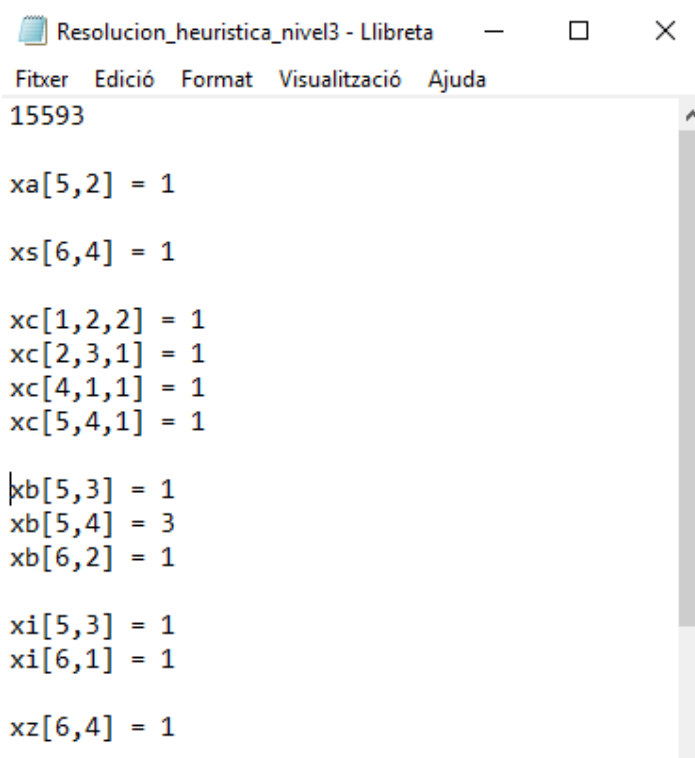


Figura 30. Detalls de l'alternativa al nivell 3.

D'aquest, se n'extreu que:

- El cost de l'alternativa és de 15593\$
- Hi ha un aerogenerador de tipus 2 situat al punt 5.
- Hi ha un panell fotovoltaic de tipus 4 situat al punt 6.
- Hi ha un cable del tipus 2 que uneixen els punts 1 i 2, del tipus 1 que uneix els punts 2 i 3, del tipus 1 que uneix els punts 4 i 1 i del tipus que uneix els punts 5 i 4.

- Hi ha una bateria del tipus 3 al punt 5, tres bateries del tipus 4 al punt 5 i una bateria del tipus 2 al punt 6.
- Hi ha un inversor del tipus 3 al punt 5 i un inversor del tipus 1 al punt 6.
- Hi ha un reguladors del tipus 4 al punt 6.

8. Pressupost

Per tal de calcular el pressupost d'aquest TFG s'ha tingut en compte diferents factors. D'una banda, s'ha valorat la quantitat d'hores que l'autor del TFG va estar ajudant a acabar el programari i realitzant el manual d'usuari. De l'altra, s'ha considerat que durant aquest període l'autor ha necessitat tenir accés a un ordinador i al programa *Microsoft Office Excel* durant aquest temps.

Els primers tres mesos es van dedicar a l'ajut a la finalització del programa i, es va deixar per més endavant la realització del manual i del cas d'exemple. Comptant que s'hi va treballar aproximadament 5 hores de dilluns a divendres, el total invertit és de 300 hores. Per dur a terme aquesta feina s'havia de tenir certs coneixements de programació i de modelització, així que es considera un preu de 25€/hora. El cost total considerant les hores de treball, doncs, és de 7.500€.

Per calcular el cost de disposar d'un ordinador i del programa *Microsoft Office Excel*, s'ha considerat, en primer lloc, que un ordinador de 1.000€ té un període de vida de 5 anys, o el que és el mateix, 200€/any i 3,8€/ setmana. Com que s'ha hagut de disposar de l'ordinador durant 3 mesos (12 setmanes), es calcula el cost d'aquesta part multiplicant 3,8€/setmana per 12 setmanes, i el resultat és 45,6€. El cost del *Microsoft Office Excel* és de 99€, i també s'ha considerat que té una vida útil de 5 anys, per tant, 19,8€/any i 0,3808€/setmana. Amb el mateix raonament que s'ha fet amb l'ordinador, s'obté que el cost d'haver disposat de *Microsoft Office Excel* ha estat de 4,57€.

Sumant els tres valors s'obté que el cost del TFG ha estat de 7.550,17€.

9. Impacte social i ambiental

Per analitzar els impactes socials i ambientals, primer es vol diferenciar els impactes que té la pròpia realització del manual amb el projecte d'electrificació de poblacions rurals.

D'una banda, l'impacte social de la realització del manual d'usuari poden ser casos en què persones que no haguessin sabut utilitzar el programa per si soles, aconseguixin fer-ho mitjançant el manual, o puguin resoldre els seus dubtes. L'impacte ambiental és nul, ja que per la seva realització només s'ha utilitzat un ordinador.

D'altra banda, l'impacte social que tindria el projecte d'electrificació de zones rurals si finalment es dugués a terme, seria el derivat d'ajudar a portar electricitat a zones on aquesta no arriba. Mitjançant l'electricitat, la gent d'aquestes poblacions podria accedir a certs recursos molt més fàcilment (il·luminació, televisió, millora en les condicions dels centres mèdics...) així que el seu nivell de vida milloraria considerablement. L'impacte ambiental també seria molt positiu, ja que per dissenyar aquests sistemes d'electrificació s'utilitzen energies renovables (eòlica i solar).

Finalment, però, val a dir que el manual d'usuari pot ajudar a distribuir el software de forma més senzilla, i per tant, indirectament, col·laborar a aquest impacte social i ambiental tan positiu.

Conclusions

La realitat actual és que hi ha un percentatge considerable de la població mundial que no té accés a l'energia elèctrica, la majoria de la qual viu en poblacions aïllades. En aquest context, projectes com el que proposa un grup d'investigadors de la UPC de dissenyar una metodologia per l'electrificació de zones rurals són necessaris.

La metodologia, que té com a objectiu calcular el disseny per l'electrificació d'una població, es basa en la utilització d'energies renovables (eòlica i solar) tot combinant punts individuals amb microxarxes de distribució. Tot aquest procés es divideix en dues etapes.

En la primera es realitzen 3 avaluacions de la zona. La socioeconòmica permet determinar els punts de consum, la demanda i aspectes socials de la comunitat. L'avaluació energètica estudia els recursos energètics disponibles en els diferents punts. L'avaluació tècnica, estudia els diferents equips que es poden utilitzar.

La segona etapa és en la que pròpiament es realitza el disseny. Es divideix en 3 nivells. En el primer nivell s'estudia l'efecte de la demanda sobre el cost de l'alternativa, en el segon l'efecte de la gestió del sistema i en el tercer de la seguretat del subministrament. Al mateix temps, cadascun d'aquests nivells comprèn un procés de generació d'alternatives d'electrificació i un de selecció d'alternatives. Pel primer procés s'ha realitzat un model matemàtic on s'inclouen restriccions per cada nivell. Pel segon s'utilitza un procés multicriteri utilitzant la tècnica de la programació compromís.

A partir de tota aquesta metodologia, s'ha realitzat un programa informàtic que realitza el procés. El programa s'inicia en el punt en què s'han d'introduir les dades de la comunitat. Després, juntament amb les restriccions que ha d'anar indicant l'usuari, es generen les alternatives pels diferents nivells. L'usuari pot analitzar les alternatives tot indicant diferents pesos per cada subcriteri. A més, el programa genera una sèrie d'arxius que contenen tota la informació de la sessió per tal que, un cop tancat, es pugui accedir a aquesta.

En la realització d'aquest TFG s'ha col·laborat a la creació d'aquest programa treballant-hi en la etapa de validació. Durant un temps, s'ha treballat junt amb programadors per tal de finalitzar el programa. La funció de l'autor del TFG ha estat la de comprovar que el programa

funciona correctament, tant des d'un punt de vista d'aplicació de la metodologia com des d'un punt de vista de la interfície. És a dir, s'ha comprovat que el programa proporciona els mateixos resultats que ho faria l'aplicació de la metodologia, i també que la interacció amb l'usuari fos correcta.

Tot aquest procés també ha servit per familiaritzar-se amb el programari, fet que ha facilitat molt les següents tasques a realitzar.

Un cop confirmada el correcte funcionament del programa, s'ha realitzat un cas d'exemple, és a dir, el disseny d'electrificació d'una població mitjançant el programa. Aquest punt és interessant des de dues vessants. D'una banda, pot resultar il·lustratiu i clarificador veure el procés a realitzar, ja que es tracta d'una forma iterativa de resoldre projectes, i també suposa una oportunitat per veure els resultats de forma gràfica. De l'altra banda, es comprova i es demostra el correcte funcionament del programa i l'ús que es pot fer d'aquest.

Posteriorment, s'ha realitzat un manual d'usuari amb el que qualsevol que vulgui pot ser capaç d'utilitzar aquest programa. Es segueixen tots els passos que l'usuari seguiria, des de la introducció de dades fins a l'obtenció dels resultats, i es consideren totes les opcions pels que es poden donar. En aquest manual també s'explica com interpretar els resultats. La seva realització busca com a objectiu facilitar la distribució del programa.

Aquests dos últims punts, que cronològicament es van realitzar en l'ordre en què s'han exposat, en aquest treball s'han decidit invertir i presentar primer el manual i després l'exemple. Això és a causa que s'ha considerat que es podria entendre millor l'exemple un cop s'hagués vist el manual prèviament.

Agraïments

En primer lloc voldria donar les gràcies a l'Ariadna Pérez, la programadora que va iniciar el programa en què es basa aquest TFG, ja que sempre va tenir paciència per explicar-me aquelles coses que no entenia tot i que no fos la seva feina.

També al Bruno Domenech, tutor del treball, per deixar-me espai per treballar però també saber trobar un moment per atendre'm sempre que el necessitava.

Bibliografia

- [1] Bruno Domenech. *Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales* (2013)
- [2] Sergi de la Fuente Vallespi. *Millora del software de càlcul per al disseny de sistemes d'electrificació autònoms per a comunitats rurals* (2016)

Referències bibliogràfiques

- [3] Lucila Izquierdo, Julio Eisman. *La electrificación sostenible de zonas rurales aisladas de países en desarrollo mediante microsistemas eléctricos renovables* (2009)
- [4] Lucía Arraiza Bermudez-Cañete. *Electrificación de zonas rurales aisladas* (2008)
- [5] Alexandra del Carmen Hernández Dinorín, Rosa María Romero González, Salvador Pérez Arce Silva. *Energías alternativas para la electrificación rural en los países en desarrollo* (2010)